

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2004-212416
(P2004-212416A)

(43) 公開日 平成16年7月29日 (2004.7.29)

(51) Int. Cl. ⁷	F I		テーマコード (参考)
GO2B 6/12	GO2B 6/12	F	2H047
GO2B 5/20	GO2B 5/20		2H048
GO2F 1/01	GO2F 1/01	C	2H079
	GO2F 1/01	F	
	GO2B 6/12	Z	
審査請求 有 請求項の数 22 O L (全 17 頁) 最終頁に続く			

(21) 出願番号	特願2002-378438 (P2002-378438)	(71) 出願人	503360115
(22) 出願日	平成14年12月26日 (2002.12.26)		独立行政法人 科学技術振興機構
			埼玉県川口市本町4丁目1番8号
		(74) 代理人	100095670
			弁理士 小林 良平
		(71) 出願人	000005832
			松下電工株式会社
			大阪府門真市大字門真1048番地
		(74) 代理人	100095670
			弁理士 小林 良平
		(74) 代理人	100077171
			弁理士 竹内 尚恒
		(72) 発明者	野田 進
			京都府宇治市五ヶ庄 京大職員宿舍231号
		最終頁に続く	

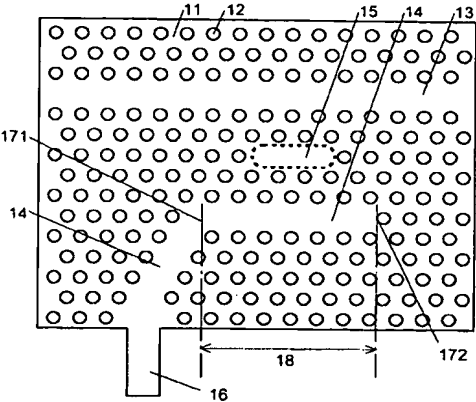
(54) 【発明の名称】 電磁波周波数フィルタ

(57) 【要約】

【課題】 2つの導波路間で所定の周波数の電磁波を高い効率で授受することができる電磁波周波数フィルタを提供する。

【解決手段】 入力導波路13と出力導波路14との間に、両導波路に近接して、所定の周波数の電磁波に共振する共振器15を設ける。出力導波路14は、共振器15近傍の所定範囲18においては入力導波路と平行とし、それ以外の範囲では入力導波路13の間の距離が所定範囲18内におけるそれよりも長くなるようにする。これにより、所定周波数の電磁波が共振器15を介して入力導波路13と出力導波路14との間で授受される。一方、所定範囲18以外の範囲において、所定周波数以外のノイズとなる電磁波が入力導波路13と出力導波路14との間で授受されることは抑制される。この電磁波周波数フィルタは、2次元フォトニック結晶を用いて好適に構成することができる。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

- a)電磁波を導波する入力導波路と、
b)電磁波を導波する導波路であって、その長手方向の所定の範囲における前記入力導波路との距離が前記所定範囲外における前記入力導波路との距離よりも小さくなるように配置される出力導波路と、
c)前記入力導波路と出力導波路との間の前記所定範囲内に配置され、所定の周波数の電磁波に共振する共振器と、
を備えることを特徴とする電磁波周波数フィルタ。

【請求項 2】

前記出力導波路を複数本備え、各出力導波路と前記入力導波路との間であって且つ所定範囲内に、各出力導波路毎に所定の周波数の電磁波に共振する共振器を備えることを特徴とする請求項 1 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 3】

前記各出力導波路毎の共振器の共振周波数が各々異なることを特徴とする請求項 2 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 4】

前記入力導波路及び出力導波路のいずれか一方又は両方が前記所定範囲の端に屈曲部を有することを特徴とする請求項 1 ～ 3 のいずれかに記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 5】

前記共振器の共振周波数が前記屈曲部の高透過率周波数帯域に含まれることを特徴とする請求項 4 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 6】

- a)スラブ状の本体に周期的に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域を設けた 2 次元フォトニック結晶と、
b)前記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される入力導波路と、
c)前記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路であって、その長手方向の所定の範囲における前記入力導波路との距離が前記所定範囲外における前記入力導波路との距離よりも小さくなるように配置される出力導波路と、
d)前記入力導波路と出力導波路との間の前記所定範囲内に配置され、所定の周波数の電磁波に共振する点状欠陥から成る共振器と、
を備えることを特徴とする電磁波周波数フィルタ。

【請求項 7】

前記点状欠陥が異屈折率領域を欠損させることにより形成されるドナー型点状欠陥であることを特徴とする請求項 6 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 8】

前記出力導波路を複数本備え、各出力導波路と前記入力導波路との間であって且つ所定範囲内に、各出力導波路毎に所定の周波数の電磁波に共振する共振器を備えることを特徴とする請求項 6 又は 7 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 9】

前記各出力導波路毎の共振器の共振周波数が各々異なることを特徴とする請求項 8 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 10】

- a)スラブ状の本体内に 2 以上の禁制帯領域を設け、各禁制帯領域内において、各禁制帯領域毎に異なる周期で周期的に本体に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域を設けた面内ヘテロ構造 2 次元フォトニック結晶と、
b)各禁制帯領域内において前記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成され、全禁制帯領域を通過する入力導波路と、
c)各禁制帯領域毎に前記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路であって、その長手方向の所定の範囲における前記入力導波路との距離が前記所定範囲外

10

20

30

40

50

における前記入力導波路との距離よりも小さくなるように配置される出力導波路と、
d)前記入力導波路と出力導波路との間の前記所定範囲内に配置され、所定の周波数の電磁波に共振する点状欠陥から成る共振器と、
を備えることを特徴とする電磁波周波数フィルタ。

【請求項 1 1】

前記点状欠陥が異屈折率領域を欠損させることにより形成されるドナー型点状欠陥であることを特徴とする請求項 1 0 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 1 2】

各禁制帯領域における入力導波路の透過周波数帯域の一部が、その禁制帯領域の一方の側にある全ての禁制帯領域の入力導波路透過周波数帯域に含まれず、それとは反対側にある全ての禁制帯領域の入力導波路透過周波数帯域に含まれ、各禁制帯領域に設けられる前記共振器における共振周波数が、前記一部の透過周波数帯域に含まれることを特徴とする請求項 1 0 又は 1 1 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 1 3】

前記各禁制帯領域において、前記一方の側の隣接禁制帯領域との境界面とその禁制帯領域に属する共振器の間の距離を、その禁制帯領域の共振器の共振周波数を有しこの共振器で反射される電磁波と、同周波数でこの点状欠陥を通過し禁制帯領域境界面で反射される電磁波との位相差が π となるように、設定したことを特徴とする請求項 1 2 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 1 4】

前記点状欠陥が直線状に隣接する 3 個の異屈折率領域を欠損させることによって形成される直線状ドナー型クラスタ欠陥であることを特徴とする請求項 1 2 又は 1 3 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 1 5】

前記入力導波路及び出力導波路のいずれか一方又は両方が前記所定範囲の端に屈曲部を有することを特徴とする請求項 6 ～ 1 4 のいずれかに記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 1 6】

前記共振器の共振周波数が、前記屈曲部の高透過率周波数帯域に含まれることを特徴とする請求項 1 5 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 1 7】

前記屈曲部における異屈折率領域が屈折率、周期、形状又は大きさの少なくともいずれかにおいて他の異屈折率領域と異なることを特徴とする請求項 1 6 に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 1 8】

少なくとも 1 つの前記共振器の一部又は全部が、外部からの作用により屈折率が変化する材料から成ることを特徴とする請求項 6 ～ 1 7 のいずれかに記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 1 9】

前記出力導波路に前記共振器の共振周波数を有する電磁波を反射する反射部を設け、共振器から出力導波路に導入される電磁波と、反射部により反射される電磁波との位相差が 0 になるように共振器と反射部の間の距離を設定したことを特徴とする請求項 1 ～ 1 8 のいずれかに記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 2 0】

前記出力導波路に前記共振器の共振周波数を有する電磁波を反射する反射部を設け、共振器により反射される電磁波と、反射部により反射される電磁波との位相差が π になるように共振器と反射部の間の距離を設定したことを特徴とする請求項 1 ～ 1 8 のいずれかに記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項 2 1】

前記反射部が、出力導波路の端部、前記所定範囲の端に設けた屈曲部、所定範囲の端以外の位置に設けた屈曲部、及び前記一方の側の隣接禁制帯領域との境界面のいずれかから成

10

20

30

40

50

ることを特徴とする請求項19又は20に記載の電磁波周波数フィルタ。

【請求項22】

少なくとも1つの前記共振器が、共振する電磁波の一部を外部へ放射することを特徴とする請求項1～21のいずれかに記載の電磁波周波数フィルタ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、所定の周波数の光や電磁波を導波路から取り出す周波数フィルタに関する。この周波数フィルタは光通信の分野等において用いられる。

【0002】

【従来の技術】

光通信においては、単位時間に送信できる情報量を増大させるために、一本の伝送路に複数の波長(周波数)の光を伝播させ、それぞれに別個の信号を乗せる波長分割多重方式が用いられている。この波長分割多重方式においては、伝送路の入口側で各波長の光を混合し、混合された光を出口側で各波長ごとに取り出す。そのために、光の合波器及び分波器、あるいは波長フィルタ(周波数フィルタ)が必要となる。

【0003】

そのような分波器として、現在はアレイ導波路回折格子が用いられている。しかし、アレイ導波路回折格子では通常、石英系光導波路を用いており、光の損失を小さくするために現状では数cm角程度の大きなものを用いざるを得ない。そこで、分波器の小型化を図るために、フォトニック結晶を用いた周波数フィルタが検討されている。

【0004】

フォトニック結晶とは周期屈折率分布をもった光学機能材料であり、光子のエネルギーに対してバンド構造を形成する。特に、光の伝播が不可能となるエネルギー領域(フォトニックバンドギャップ)が形成されることが特徴である。このフォトニック結晶中に適切な欠陥を導入することにより、フォトニックバンドギャップ中にこの欠陥によるエネルギー準位(欠陥準位)が形成される。これによって、上記フォトニックバンドギャップ中のエネルギーに対応する周波数範囲のうち、欠陥準位のエネルギーに対応する周波数の光のみが存在可能になる。結晶中の上記欠陥を線状にすれば所定の周波数の光を伝播する光導波路となり、結晶中の欠陥を点状にすれば所定の周波数の光に共振する光共振器となる。

【0005】

特許文献1には、円柱孔を三角格子状に周期的に配列することによって周期屈折率分布を設けた2次元フォトニック結晶において、この円柱孔を線状に欠損させることによって導波路を形成し([0025]、図1)、導波路近傍に点欠陥を形成する([0029]、図1)ことが記載されている。特許文献1においては、実施例として周期的に配列された円柱孔の径を大きくすることによって形成される点欠陥について検討している。この構成によって、導波路を伝播する光のうち点欠陥の共振周波数を有する光を外部に取り出す分波器、及び点欠陥の共振周波数を有する光を外部から導波路に導入する合波器が作製される。

【0006】

【特許文献1】

特開2001-272555号公報([0025]、[0029]、図1)

【0007】

また、本願発明者らは、特願2002-086221号出願において、周期屈折率分布を形成する異屈折率領域のうち隣接する2個以上の異屈折率領域を欠陥とすることによってクラスタ欠陥を形成することを提案している。ここで異屈折率領域の欠陥は、その異屈折率領域の屈折率を他の異屈折率領域の屈折率と異なるものとすることによって形成する。他の異屈折率領域よりも屈折率が高いものをドナー型欠陥、低いものをアクセプタ型欠陥と呼ぶ。前記特許文献1に記載の、円柱孔を大きくすることによって形成する欠陥はアクセプタ型欠陥であり、異屈折率領域を設けないことによって形成する欠陥はドナー型欠陥である。クラスタ欠陥と、1個の異屈折率領域のみを欠損させて形成される点欠陥とを総称して「点

10

20

30

40

50

状欠陥」と呼ぶ。

【0008】

前記特願2002-086221号出願において、本願発明者らは更に、それぞれ異なる周期で異屈折率領域を配置した複数の禁制帯領域を有し、それぞれの禁制帯領域に点状欠陥を設けた面内ヘテロ構造2次元フォトリック結晶を提案している。これにより、各禁制帯領域に同じ形状の点状欠陥を設けた場合にも、異屈折率領域の周期の違いにより、各点状欠陥はそれぞれ異なる周波数の光に共振する。

【0009】

特許文献1及び特願2002-086221号出願の波長分合波器においては、点状欠陥を介して導波路と外部との間で光の導入及び取り出しを行っている。一方、特許文献2には、2次元フォトリック結晶内に2つの直線導波路を設け、この2つの直線導波路の間に点状欠陥を設ける(特許文献2の図3及び図8参照)ことが記載されている。この構成によって、点状欠陥の共振周波数を有する光を一方の導波路から他方の導波路に導入する。これは合波器となる。また、一方の導波路に複数の周波数が重畳した光を伝播させ、そこから所定の周波数の光のみを他方の導波路に取り出す分波器ともなる。

【0010】

【特許文献2】

特表2001-508887号公報(図3、図8)

【0011】

【発明が解決しようとする課題】

導波路と点状欠陥の間の距離を、両者の間で光の授受が行われる程度に小さくすると、2つの導波路間においても光の授受が行われる。このため、特許文献2の構成においては、点状欠陥以外の位置において2つの導波路間で所定の周波数以外の成分も含む光の授受が生じ、信号のクロストークが起こるという問題があった。

【0012】

ここまでは2次元フォトリック結晶を用いた光分波器及び光合波器を例として述べたが、光のみならず電磁波に対しても同様であり、また、2次元フォトリック結晶以外の構成を有する光周波数フィルタ(波長フィルタ)や電磁波周波数フィルタにおいても同様の問題が生じる。なお、以下において「電磁波」と記載した場合には、光を含むものとする。

【0013】

本発明はこのような課題を解決するために成されたものであり、その目的とするところは、2つの導波路間で所定の周波数の電磁波を高い効率で授受することができる電磁波周波数フィルタを提供することにある。

【0014】

【課題を解決するための手段】

上記課題を解決するために成された本発明に係る電磁波周波数フィルタは、

- a)電磁波を導波する入力導波路と、
 - b)電磁波を導波する導波路であって、その長手方向の所定の範囲における前記入力導波路との距離が前記所定範囲外における前記入力導波路との距離よりも小さくなるように配置される出力導波路と、
 - c)前記入力導波路と出力導波路との間の前記所定範囲内に配置され、所定の周波数の電磁波に共振する共振器と、
- を備えることを特徴とする。

【0015】

この電磁波周波数フィルタは、2次元フォトリック結晶を用いて構成することができる。本発明に係る2次元フォトリック結晶を用いた電磁波周波数フィルタは、

- a)スラブ状の本体に周期的に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域を設けた2次元フォトリック結晶と、
- b)前記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される入力導波路と、
- c)前記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路であって、その長

10

20

30

40

50

手方向の所定の範囲における前記入力導波路との距離が前記所定範囲外における前記入力導波路との距離よりも小さくなるように配置される出力導波路と、

d)前記入力導波路と出力導波路との間の前記所定範囲内に配置され、所定の周波数の電磁波に共振する点状欠陥から成る共振器と、
を備えることを特徴とする。

【0016】

また、この電磁波周波数フィルタは、面内ヘテロ構造を有する2次元フォトリック結晶を用いて構成することもできる。本発明に係る面内ヘテロ構造を有する2次元フォトリック結晶を用いた電磁波周波数フィルタは、

a)スラブ状の本体内に2以上の禁制帯領域を設け、各禁制帯領域内において、各禁制帯領域毎に異なる周期で周期的に本体に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域を設けた面内ヘテロ構造2次元フォトリック結晶と、

b)各禁制帯領域内において前記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成され、全禁制帯領域を通過する入力導波路と、

c)各禁制帯領域毎に前記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路であって、その長手方向の所定の範囲における前記入力導波路との距離が前記所定範囲外における前記入力導波路との距離よりも小さくなるように配置される出力導波路と、

d)前記入力導波路と出力導波路との間の前記所定範囲内に配置され、所定の周波数の電磁波に共振する点状欠陥から成る共振器と、
を備えることを特徴とする。

【0017】

この面内ヘテロ構造2次元フォトリック結晶を用いた電磁波周波数フィルタにおいて、各禁制帯領域における入力導波路の透過周波数帯域の一部が、その禁制帯領域の一方の側にある全ての禁制帯領域の入力導波路透過周波数帯域に含まれず、それとは反対側にある全ての禁制帯領域の入力導波路透過周波数帯域に含まれ、各禁制帯領域に設けられる前記共振器における共振周波数が、前記一部の透過周波数帯域に含まれることが望ましい。

【0018】

【発明の実施の形態】

(1)本発明に係る電磁波周波数フィルタ

本発明の電磁波周波数フィルタは、入力導波路と出力導波路との間に、特定の1周波数成分の電磁波に共振する共振器を有する。この電磁波周波数フィルタがこれら3つの構成要素を備えることは特許文献2の電磁波周波数フィルタと同様であるが、本発明においては、これら3つの位置関係に特徴を有する。それは、入力導波路と出力導波路の間の距離が、所定の範囲において最も小さくなるようにし、この所定範囲内の入力導波路と出力導波路との間に共振器を設けることである。

【0019】

このような構成とする理由は以下の通りである。この電磁波周波数フィルタにおいては、入力導波路と共振器とがエネルギー的に結合し、同様に共振器と出力導波路とがエネルギー的に結合することにより、入力導波路と出力導波路との間で共振器の共振周波数を有する電磁波を授受する。授受される電磁波の強度を大きくするためには、入力導波路－共振器間及び共振器－出力導波路間の距離を小さくしエネルギー的な結合を強くすることが望ましい。そのため、共振器の存在する範囲においては、入力導波路と出力導波路の間の距離は小さい方が望ましい。一方、入力導波路と出力導波路の間の距離を小さくすると、共振器を介さずに直接授受される電磁波の強度が増加する。これは、共振器の共振周波数以外の周波数を有する電磁波も授受されるため望ましくない。それを避けるため、共振器が存在する範囲以外においては、入力導波路と出力導波路の間の距離は広い方が望ましい。これら2つの条件を共に満たすために、本発明の電磁波周波数フィルタは前記の構成とした。

【0020】

この構成により、入力導波路から出力導波路に所定の周波数の電磁波を分波する分波器と

して用いることができる。この分波器と同じ構成の電磁波周波数フィルタを、分波器における「出力導波路」から「入力導波路」に所定の周波数の電磁波を導入する合波器として用いることもできる。この場合、分波器の「出力導波路」が合波器の入力導波路となり、分波器の「入力導波路」が合波器の出力導波路となる。なお、本明細書において「入力導波路」及び「出力導波路」は、別段の記載がない場合には分波器の入力導波路及び出力導波路を指す。

【0021】

本発明の入力導波路及び出力導波路の典型的な構成として、入力導波路、出力導波路のいずれか一方又は両方が前記所定範囲の境界において角度をもって屈曲する形状を有するものを挙げることができる。また、屈曲部を設けず、入力導波路、出力導波路のいずれか一方又は両方を所定範囲外において滑らかに曲げるようにしてもよい。

10

【0022】

屈曲部においては、導波路の前記所定範囲を通過する電磁波の全てが通過するとは限らない。屈曲部を透過する電磁波の透過率の周波数依存性は、導波路の前記所定範囲における電磁波の透過率の周波数依存性とは異なり、屈曲部の構造に依存する。これを利用して、屈曲部の構造を最適化し、共振器の共振周波数が、所定の値以上の透過率を有する高透過率周波数帯域に含まれるようにすることにより、その周波数の電磁波を効率よく通過することができる。また、屈曲部において、所定周波数以外のノイズとなる電磁波を通過し難くし、ノイズを低減することができる。

【0023】

更に、出力導波路の端部を入力導波路から離すことができるため、出力導波路の端部を所望の位置に配置することが可能になる。これは、特許文献2の直線状の出力導波路では不可能であった。

20

【0024】

1つの入力導波路に対して複数本の出力導波路を設けてもよい。この場合、各出力導波路毎に、入力導波路との間に共振器を設ける。各共振器が異なる周波数の電磁波に共振することにより、異なる複数の周波数が重畳した電磁波が伝播する入力導波路と各出力導波路との間で、それぞれ異なる周波数の電磁波を授受することができる。なお、特許文献2の構成によれば、出力導波路が入力導波路に平行な直線状であるため、複数本の出力導波路を設けることはできない。

30

【0025】

出力導波路の、電磁波の入出力を行わない側に反射部を設け、共振器と反射部の間の距離を適切に設定することにより、分波効率又は合波効率を高めることができる。このような反射部は、出力導波路に行き止まり(端部)を設けることや、屈曲部を設けることにより形成することができる。ここで反射部として用いる屈曲部は、所定範囲の境界に設けた前記屈曲部であってもよく、それとは別に設けたものであってもよい。

【0026】

分波器の場合には、共振器から出力導波路に導入される電磁波のうち、反射部の反対側(入出力側)へ伝播する電磁波と、反射部で反射され入出力側へ伝播する電磁波との位相差が0になるように共振器と反射部の間の距離を設定することが望ましい。これにより、この2つの電磁波が干渉により強め合い、取り出される電磁波の強度を強くすることができる。なお、電磁波が反射部で反射される際に、反射部の構成によって位相が変化することがある。この反射の際に位相が反転する場合には、共振器と反射部の間の距離を共振波長の $(2n-1)/4$ 倍(n は正の整数、以下同じ)とする。一方、反射の際に位相が変化しない場合には、この距離を共振波長の $n/2$ 倍とする。

40

【0027】

合波器の場合には、合波器の入力導波路(分波器の出力導波路)から共振器に向かう電磁波のうち、共振器で反射される電磁波と、共振器を通過し反射部で反射される電磁波との位相差が π になるように共振器と反射部の間の距離を設定することが望ましい。これにより、この2つの反射波が干渉により弱め合い、共振器に導入される電磁波の強度を強くする

50

ことができる。なお、反射部の場合と同様に、電磁波が共振器で反射される際にも共振器の構成によって位相が変化することがある。共振器及び反射部において共に電磁波の位相が反転するか、又は共に位相が変化しない場合には、この距離を共振波長の $(2n-1)/4$ 倍とする。また、共振器又は反射部の一方の反射においてのみ電磁波の位相が反転し、他方の反射においては位相が変化しない場合には、この距離を共振波長の $n/2$ 倍とする。

【0028】

(2) 2次元フォトリック結晶を用いた本発明に係る電磁波周波数フィルタ

ここまでに述べた電磁波周波数フィルタは、例えば誘電体導波路及びリング共振器を用いた電磁波フィルタ等を用いて構成することもできるが、電磁波の損失が少なく且つ装置の小型化を図ることができるという点で、以下に述べる2次元フォトリック結晶を用いるのが好適である。

【0029】

本発明の2次元フォトリック結晶電磁波周波数フィルタは、面内方向の大きさに比べて厚さが十分薄い板状体であるスラブを本体とし、この本体に、それとは屈折率の異なる領域を周期的に配置することによって構成される2次元フォトリック結晶を母体とする。この母体の2次元フォトリック結晶においては、周期的な異屈折率領域の存在によりフォトリックバンドギャップが形成され、その範囲内のエネルギーを持つ電磁波が存在できない。即ち、それに対応する周波数帯の電磁波は本体を通過することができない。本体の材料としては、例えばSiやInGaAsPを用いることができる。異屈折率領域とは、本体とは異なる屈折率を有する材料からなる領域であるが、典型例として前記特許文献1に記載された円柱孔がある。円柱孔であれば、本体に孔を開けるだけでよく、何らかの部材を本体に配置するよりも容易に作製することができる。

【0030】

本体内に周期的に配置された異屈折率領域の一部に欠陥を設けると、そこで周期性が乱される。欠陥の屈折率や大きさ等のパラメータを適切に設定することにより、フォトリックバンドギャップ中に欠陥準位が形成され、この欠陥準位のエネルギーに対応する周波数の電磁波が欠陥の位置において存在することができるようになる。この欠陥を線状に連続的に設けることにより、フォトリックバンドギャップ中の一定の周波数範囲の電磁波を透過する導波路を形成することができる。本発明においては、入力導波路と出力導波路とを、両者の距離が所定の範囲において最も小さくなるように形成する。

【0031】

前記所定範囲内であって、入力導波路と出力導波路との間の異屈折率領域に点状欠陥を設ける。この点状欠陥は前記の点欠陥及びクラスタ欠陥のいずれでもよく、また、前記のアクセプタ型及びドナー型のいずれでもよい。点状欠陥の種類、大きさ、位置等のパラメータを適切に設定することにより、フォトリックバンドギャップ中に所定の欠陥準位が形成され、欠陥準位のエネルギーに対応する周波数の電磁波のみが欠陥位置において共振する。即ち、この点状欠陥が共振器となる。

【0032】

この構成により、入力導波路と出力導波路との間で共振器の共振周波数を有する電磁波を授受することができる。それと共に、それ以外の周波数を有する電磁波が入力導波路と出力導波路との間で直接授受されることを防ぐことができる。

【0033】

共振器から結晶面に垂直な方向に電磁波が漏れて損失となることを抑制するために、共振器は異屈折率領域を欠損させたドナー型点状欠陥であることが望ましい。

【0034】

入力導波路又は出力導波路の前記所定範囲の境界に屈曲部を設けることにより、両導波路の距離が所定の範囲において最も小さくなるようにすることができる。この屈曲部における異屈折率領域の屈折率、周期、形状、大きさのうち少なくとも1つのパラメータを調節することによって、この屈曲部の透過周波数帯域を制御することができる。これを利用して、この屈曲部において、共振器の共振周波数を有する電磁波を通過し易く、それ以外の

10

20

30

40

50

周波数の電磁波を通過し難くすることができる。これにより屈曲部は、出力導波路中の所定周波数以外のノイズとなる電磁波を低減する役割を果たす。

【0035】

2次元フォトリック結晶においても前記と同様に、出力導波路の電磁波の出入力側の反対側に端部や屈曲部等から成る反射部を設け、共振器と反射部の間の距離を適切に設定することにより、分波効率又は合波効率を高めることができる。この距離の条件も前記と同様である。なお、電磁波が2次元フォトリック結晶の点状欠陥で反射される際には電磁波の位相は反転するため、合波器における共振器－反射部間の距離は、反射部で反射される電磁波の位相変化を考慮して設定する必要がある。

【0036】

出力導波路を複数本設け、各出力導波路毎に異なる周波数の電磁波に共振する共振器を設けることにより、入力導波路と各出力導波路との間で、それぞれ異なる単一周波数の電磁波を授受することができることも前記と同様である。

【0037】

光、圧力、熱等の外部からの作用により屈折率が変化する性質を持つ材料がある。例えば、InGaAsP系やInGaAlAsP系等の半導体において、量子井戸のバンドフィリング効果によって、レーザを照射することにより電荷密度が変化し、屈折率が変化するものが存在する。このような材料を共振器(点状欠陥)の一部又は全部に用いると、外部作用による屈折率の変化に伴い共振器における共振周波数が変化する。これにより、外部作用印加中のみ所定の周波数の電磁波を入力導波路と出力導波路との間で授受するようにすることができる。それとは逆に、外部作用印加中には所定周波数の電磁波を授受しないようにすることもできる。これらは、外部作用により出力導波路への取り出し(分波器の場合)又は導入(合波器の場合)をON/OFFするスイッチの役割を果たす。更に、外部作用の強さを調節することによって、授受する電磁波の周波数を制御することもできる。

【0038】

出力導波路を複数本設け、各共振器毎にこれらの屈折率可変部材を設けることにより、電磁波の授受を行う出力導波路を外部作用の印加により選択することができる。複数の出力導波路においてそれぞれ異なる共振周波数の共振器を導波路近傍に設ければ、外部作用により出力導波路を選択し、出力電磁波の周波数を選択することができる。それに対して、複数の出力導波路に同一共振周波数の共振器を導波路近傍に設ければ、同一周波数の出力電磁波を異なる出力導波路から出力することができる。

【0039】

前記のように、結晶面に垂直な方向に共振器から電磁波が漏れることは損失となるため抑制することが望ましいが、意図的に共振器から電磁波をわずかに漏洩させることが有用である場合もある。例えば、漏洩した電磁波を測定することにより、入力導波路と出力導波路との間で授受される電磁波の強度を測定することができる。

【0040】

(3)面内ヘテロ構造2次元フォトリック結晶を用いた本発明に係る電磁波周波数フィルタ
前記特願2002-086221号出願において提案した面内ヘテロ構造2次元フォトリック結晶を用いて、本発明の電磁波周波数フィルタを以下のように構成する。本体を、分合波する周波数の種類の数と同じ数の領域に分ける。この領域を禁制帯領域と呼ぶ。各禁制帯領域毎に異なる周期で異屈折率領域を配置し、共通の禁制帯領域を形成するようにする。禁制帯領域の全てを通るように異屈折率領域の欠陥を線状に連続的に設けることによって、入力導波路を形成する。各禁制帯領域毎に、入力導波路との距離が所定の範囲において最も小さくなるように出力導波路を設ける。各出力導波路と入力導波路との間の前記所定範囲内に点状欠陥(共振器)を設ける。この点状欠陥は前記と同様にドナー型点状欠陥であることが望ましい。共振周波数は異屈折率領域の周期に依存するため、各禁制帯領域毎に異屈折率領域の周期を設定することによって、各出力導波路に導入される(分波器の場合)電磁波の周波数を制御することができる。

【0041】

更に、入力導波路において電磁波が伝播する方向に、共振周波数の昇順又は降順に禁制帯領域が並ぶようにすることが望ましい。共振周波数の昇順に禁制帯領域を並べる場合にはその順に異屈折率領域の周期を小さくし、降順に禁制帯領域を並べる場合にはその順に異屈折率領域の周期を大きくする。これにより、各禁制帯領域における入力導波路の透過周波数帯域の一部が、重畳波の伝播方向に隣接する禁制帯領域の入力導波路透過周波数帯域には含まれないようにすることができる。各禁制帯領域毎に、この一部透過周波数帯域に含まれる周波数を共振周波数とする共振器を設ける。これにより、分波器において、点状欠陥の共振周波数に対応する電磁波のうち点状欠陥に導入されることなく通過した電磁波は、隣接禁制帯領域との境界において全反射され、再びその点状欠陥に戻る。そのため、この共振器を通して出力導波路に導入される電磁波の割合を高くし、分波効率を向上することができる。合波器においても同様に効率を向上することができる。

10

【0042】

面内ヘテロ構造２次元フォトリック結晶においても前記と同様に、出力導波路の電磁波の出入力側の反対側に反射部を設け、共振器と反射部の間の距離を適切に設定することにより、分波効率又は合波効率を高めることができる。この距離の条件も前記と同様である。この場合の反射部は、前記の出力導波路の端部や屈曲部等から成るものに加えて、その共振器の共振周波数の電磁波を透過しない隣接禁制帯領域との境界まで出力導波路を設け、その境界を反射部としたものでもよい。

【0043】

外部作用により屈折率が変化する材料を共振器に用いることにより出力導波路への電磁波の取り出し又は導入をON/OFFすることができること、及び共振器からの電磁波の漏れを検出することによって入力導波路と各出力導波路との間で授受される電磁波の強度を検出することができることは、面内ヘテロ構造２次元フォトリック結晶電磁波周波数フィルタに対しても同様に適用することができる。

20

【0044】

【発明の効果】

本発明のように、共振器の存在する所定の範囲内では入力導波路と出力導波路の間の距離を近くし、それ以外では両者の距離を遠くすることにより、高い効率で、所定の周波数の電磁波を共振器を介して入力導波路と出力導波路との間で授受することができる。それと共に、所定周波数以外の電磁波を両導波路間で授受することを防ぐことができる。また、本発明では出力導波路の端部を入力導波路から離すことができるため、出力導波路の端部を所望の位置に配置することが可能になり、所定周波数の電磁波を所望の位置に出力することができる。

30

【0045】

この電磁波周波数フィルタは、２次元フォトリック結晶を用いて構成することが望ましい。特に、共振器にドナー型点状欠陥を用いることにより、入力導波路と出力導波路との電磁波の授受の際に共振器から外部へ電磁波が漏れて損失となることを防ぐことができる。また、面内ヘテロ構造２次元フォトリック結晶を用い、入力導波路を透過する所定周波数の電磁波を禁制帯領域境界において反射させことにより、共振器に導入される電磁波の強度を向上させ、入力導波路と出力導波路との授受の効率を向上させることができる。

40

【0046】

【実施例】

本発明に係る電磁波周波数フィルタの一実施例として、図１に２次元フォトリック結晶を用いた電磁波(光)周波数フィルタの一構成例を示す。本体１１に、異屈折率領域である空孔１２を三角格子状に周期的に配置する。空孔１２を線状に欠損させることにより入力導波路１３を形成する。同様に空孔１２を線状に欠損させることにより、所定範囲１８においては入力導波路１３と平行に、それ以外の範囲においては入力導波路１３から離れるように出力導波路１４を形成する。出力導波路１４の一方の端には外部導波路１６を接続する。外部導波路１６には、例えば本体１１と同じ材料からなる細線導波路を用いることができる。出力導波路１４の他方の端には、空孔１２を設ける(空孔１２の欠損を設けな

50

い)ことにより終端部 172 を設ける。終端部 172 が所定範囲 18 の一方の端となる。所定範囲 18 の他方の端に、出力導波路 14 の屈曲部 171 を形成する。所定範囲 18 内であって入力導波路 13 及び出力導波路 14 の間に点状欠陥 15 を形成する。ここでは、直線状に 3 個の空孔を欠損させることにより形成される直線状ドナー型クラスタ欠陥を用いる。

【0047】

図 1 の電磁波周波数フィルタの動作を、図 2 を用いて説明する。入力導波路 13 には複数の周波数 f_1, f_2, \dots, f_n が重畳した電磁波が伝播する。このうち、点状欠陥 15 の共振周波数 f_k の電磁波が、点状欠陥 15 を介して出力導波路 14 に導入される。出力導波路 14 に導入された電磁波は、屈曲部 171 を経て外部導波路 16 に取り出される。

10

【0048】

この構成においては、入力導波路 13 と出力導波路 14 とが前記所定範囲 18 以外の範囲では近接しないようにすることにより、2 つの導波路間で所定の周波数以外の成分を含む電磁波の授受が生じることを抑制することができる。また、点状欠陥 15 がドナー型点状欠陥であるため、電磁波が 2 次元フォトニック結晶の面外に漏出し損失となることを抑制することができる。

【0049】

図 3 に、2 次元フォトニック結晶を用いた電磁波周波数フィルタの他の構成例を示す。図 1 の電磁波周波数フィルタと同様に本体 11、空孔 12 及び入力導波路 13 を設けたフォトニック結晶に、出力導波路を複数本設け(出力導波路 141、142、...)、それらに接続して外部導波路 161、162、... を設ける。各出力導波路 141、142、... と入力導波路 13 との間に、それぞれ異なる共振周波数を有する点状欠陥 151、152、... を設ける。ここでは、点状欠陥 151 に直線状 3 欠陥ドナー型クラスタ欠陥を、点状欠陥 152 に三角形状 3 欠陥ドナー型クラスタ欠陥を用いる例を示す。なお、図 3 には 2 組の出力導波路、外部導波路及び点状欠陥を示したが、これらが 3 組以上の場合であっても同様に構成することができる。

20

【0050】

この構成によって、入力導波路 13 を伝播する複数の周波数 f_1, f_2, \dots, f_n が重畳した電磁波のうち、各点状欠陥 151、152、... の共振周波数を有する電磁波が各点状欠陥を介して出力導波路 141、142、... に導入される。これは、異なる周波数を有する複数の電磁波を出力導波路に抽出する電磁波周波数フィルタの役割を果たす。

30

【0051】

図 4 に、2 次元フォトニック結晶を用いた電磁波周波数フィルタの他の構成例を示す。図 3 の電磁波周波数フィルタと同様に、本体 11、空孔 12、入力導波路 13、複数の出力導波路(143、144、...)及び外部導波路(163、164、...)を設ける。本構成例においては、全ての出力導波路 143、144、... と入力導波路 13 との間に、レーザを照射することにより屈折率が変化する InGaAsP 系又は InGaAlAsP 系の材料から成る同一の屈折率可変部材 193、194、... を埋め込んだ同一の点状欠陥 153、154、... を設ける。

【0052】

点状欠陥 153、154 の共振周波数は、屈折率可変部材にレーザを照射しない時には f_1 、屈折率可変部材にレーザを照射する時には f_1' となり、レーザ照射の有無によって異なる。屈折率可変部材 193、194、... のいずれか 1 つにレーザを照射することによって、入力導波路 13 を伝播する周波数 f_1' の電磁波を外部導波路 163、164、... のうちの所望の外部導波路に取り出すことができる。例えば周波数 f_1' の電磁波を外部導波路 164 に取り出す場合には、屈折率可変部材 194 にレーザを照射する。この場合、入力導波路 13 を伝播する周波数 f_1' の電磁波は、点状欠陥 153 においては共振周波数 f_1 がこの電磁波の周波数と異なるために出力導波路 143 に導入されることなく通過し、点状欠陥 154 においては共振周波数がこの電磁波の周波数と一致するために出力導波路 144 に導入され、所望の外部導波路 164 に取り出される。このように、屈折率可変部材を埋

40

50

め込んだ点状欠陥 153、154、...は、レーザの照射によって動作するスイッチの役割を果たす。

【0053】

図5に、面内ヘテロ構造2次元フォトリック結晶を用いた電磁波周波数フィルタの一構成例を示す。本体21を複数の領域(禁制帯領域)に分割し、各領域毎に異なる配列周期 a_1 、 a_2 、 a_3 で空孔22を配置する。ここでは3つの禁制帯領域201、202、203を示したが、図5の上方に更に異なる禁制帯領域を設けてもよい。各禁制帯領域における空孔32の配列周期 a_1 、 a_2 、 a_3 、...は $a_1 > a_2 > a_3$...となるようにする。全ての禁制帯領域を通過するように入力導波路23を形成する。各禁制帯領域毎に、図1の電磁波周波数フィルタと同様に屈曲部を有する出力導波路241、242、243、...、点状欠陥251、252、253、...及び外部導波路261、262、263、...を形成する。各点状欠陥には、直線状3欠陥ドナー型クラスタ欠陥を用いる。

10

【0054】

図5の電磁波周波数フィルタの動作を、図6を用いて説明する。入力導波路23を伝播する複数の周波数 f_1 、 f_2 、...、 f_n が重畳した電磁波のうち、点状欠陥251の共振周波数 f_{k1} の電磁波が、点状欠陥251を介して出力導波路241に導入される。同様に、点状欠陥252、253、...の共振周波数 f_{k2} 、 f_{k3} 、...の電磁波が、それぞれの点状欠陥を介して出力導波路242、243、...に導入される。各出力導波路に導入された電磁波は、それぞれに接続した外部導波路に取り出される。

【0055】

点状欠陥がドナー型点状欠陥であることにより電磁波の面外方向への損失を抑制することができることは図1の電磁波周波数フィルタと同様である。後述する禁制帯領域境界における電磁波の反射を利用する際には特に、直線状3欠陥ドナー型クラスタ欠陥を用いることが望ましい。

20

【0056】

面内ヘテロ構造2次元フォトリック結晶においては、空孔32の配列周期に依存して、各禁制帯領域毎に入力導波路23中を伝播可能な電磁波の周波数帯域が異なる。そのため、図7に示すように、周波数 f_a の電磁波は、禁制帯領域201内の入力導波路において伝播可能な周波数帯域311の端部に含まれる場合には、禁制帯領域202内の入力導波路周波数帯域312には含まれない。この場合、禁制帯領域201内の入力導波路を伝播する周波数 f_a の電磁波は、禁制帯領域201と禁制帯領域202との境界271において反射される。この f_a を共振周波数とする点状欠陥251を設ければ、入力導波路を伝播する周波数 f_a の電磁波が点状欠陥251に入らずに通過しても境界271において反射されるため、点状欠陥251を介して出力導波路241に導入される周波数 f_a の電磁波の強度を、その反射が無い場合に比べて高くすることができる。共振周波数が入力導波路の周波数帯域の端部にあれば上記の条件を満たす。前記の3欠陥直線状ドナー型クラスタ欠陥を用いると、このような条件を満たすことができる。

30

【0057】

点状欠陥によって電磁波が反射されることが、出力導波路に導入される電磁波の強度を弱める原因の1つである。境界271、272、273、...における反射により電磁波の位相が反転する場合、点状欠陥251、252、253、...と境界271、272、273、...の間の距離 L_1 、 L_2 、 L_3 、...を各点状欠陥の共振波長の $(2n-1)/2$ 倍とする。これにより、境界271、272、273、...において反射される電磁波と点状欠陥251、252、253、...によって反射される電磁波とが干渉して抑制され、出力導波路に導入される電磁波の強度を更に高めることができる。

40

【0058】

出力導波路の所定範囲(例えば図1の141)を通過する電磁波の全てが屈曲部(例えば図1の171)を通過するとは限らない。屈曲部近傍の空孔12の周期、形状、大きさを調節することによって、屈曲部における電磁波の透過率の周波数依存性を制御することができる。その一例を図8及び図9に示す。図8は、図1の出力導波路の屈曲部171の直近

50

で外側の角部にある空孔 1 2 1 の径を他の空孔の径よりも小さくしたものである。図 9 (a) に屈曲部の空孔に関するパラメータを周囲と等しくする場合(図 1)、図 9 (b)に図 8 の場合の電磁波周波数帯域の透過率及び反射率を FDTD 法(時間領域差分法)によって計算した結果を示す。図 9 (b)の計算においては、図 8 の空孔 1 2 1 の半径を $0.23a$ (a は空孔 1 2 の配列周期)、その他の空孔 1 2 の半径を $0.29a$ とした。屈曲部の空孔の径を変化させることにより、透過率が最大となる一般化周波数を 0.271 ((a) の場合) から 0.267 ((b) の場合) に変化させることができる。これにより、前記の 3 欠損直線状ドナー型クラスタ欠陥の共振周波数 0.267 (一般化周波数) と一致させ、所定周波数の電磁波を効率よく通過するようにすることができる。

【0059】

図 8 の例では、共振器の共振周波数と屈曲部の最大透過率の周波数とが共に配列周期 a に比例する。そのため、1つの共振周波数について共振器及び屈曲部の設計を行えば、他の共振周波数についても配列周期 a を調節することにより、容易に共振器の共振周波数と屈曲部の最大透過率の周波数とを一致させることができる。これは特に、ヘテロ構造を用いる場合に、各異屈折率領域毎に屈曲部の設計を行う必要がないという点で有用である。また、このような制御は、屈曲部近傍の空孔 1 2 の他のパラメータを調節した場合にも同様に適用できる。

【0060】

出力導波路の両端のうちの一方に終端部を設ける場合には、他方の端における外部との電磁波の授受の効率は、終端部と共振器の間の距離に依存する。これについて、図 10 (a) に示す例を用いて計算する。入力導波路 1 3 の一方の端をポート 1、他方の端をポート 2、出力導波路 1 4 の電磁波の授受を行う側をポート 3、終端部側をポート 4 とする。ポート 1 及びポート 3 においては反射率を 0 とする。ポート 2 側には例えば隣接異屈折率領域が存在する等の理由により反射率を 1 とする。導波路終端部であるポート 4 における反射率は 1 とする。また、ポート 1～ポート 3 それぞれの共振器からの距離 d_1 , d_2 , d_3 を、いずれも共振波長の $(2n-1)/4$ 倍 (n は正の整数) とする。ポート 4 と共振器の間の距離 d_4 が共振波長の $1 \sim 1.5$ 倍の間における共振器の共振波長を有する電磁波の強度を各ポートに対して計算した結果を図 10 (b) に示す。この図より、距離 d_4 が共振波長の 1.25 倍の時、ポート 3 に共振器の共振波長を有する電磁波が全て出力されることがわかる。これは、出力導波路の端部と共振器の間の距離を共振波長の $(2n-1)/4$ 倍 (n は正の整数) の場合に対応する。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明に係る電磁波周波数フィルタの一実施例である、2次元フォトニック結晶を用いた電磁波周波数フィルタのの模式図。

【図 2】図 1 の電磁波周波数フィルタにおける電磁波の分波を説明する図。

【図 3】異なる周波数を有する複数種類の電磁波の取り出し又は導入を行う、2次元フォトニック結晶を用いた電磁波周波数フィルタの一実施例の模式図。

【図 4】所定の周波数を有する電磁波を所望の出力導波路へ出力するスイッチ機能を有する、2次元フォトニック結晶を用いた電磁波周波数フィルタの一実施例の模式図。

【図 5】本発明に係る電磁波周波数フィルタの一実施例である、面内ヘテロ構造 2次元フォトニック結晶を用いた電磁波周波数フィルタの一構成例の模式図。

【図 6】図 5 の電磁波周波数フィルタにおける電磁波の分波を説明する図。

【図 7】図 5 の電磁波周波数フィルタにおける入力導波路の透過周波数帯域と共振周波数について禁制帯領域間の関係を示す模式図。

【図 8】出力導波路の屈曲部の空孔のパラメータを調節する一例を示す模式図。

【図 9】図 1 及び図 8 における出力導波路の屈曲部の透過率を計算した結果を示すグラフ。

【図 10】出力導波路と共振器の間の距離による、各導波路の端部における共振器の共振波長を有する電磁波の強度を計算した結果を示すグラフ。

【符号の説明】

1 1、2 1 … 本体

10

20

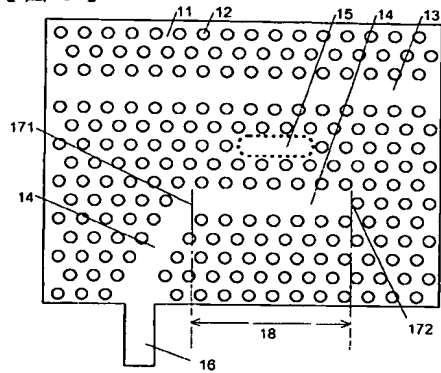
30

40

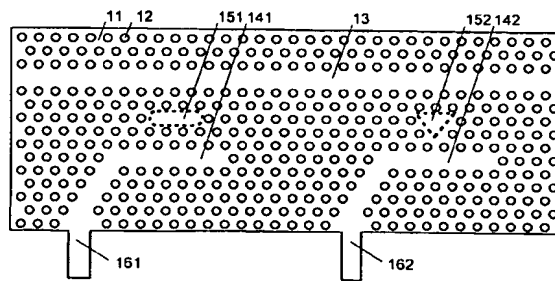
50

- 1 2、1 2 1、2 2 … 空孔
 1 3、2 3 … 入力導波路
 1 4、1 4 1、1 4 2、1 4 3、1 4 4、2 4 1、2 4 2 … 出力導波路
 1 5、1 5 1、1 5 2、1 5 3、1 5 4、2 5 1、2 5 2 … 点状欠陥
 1 6、1 6 1、1 6 2、1 6 3、1 6 4、2 6 1 … 外部導波路
 1 7 1 … 屈曲部
 1 7 2 … 終端部
 1 8 … 所定範囲
 1 9 3、1 9 4 … 屈折率可変部材
 2 0 1、2 0 2、2 0 3 … 禁制帯領域
 2 7 1、2 7 2、2 7 3 … 禁制帯領域境界

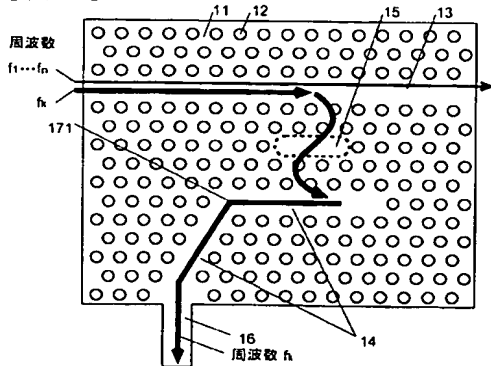
【図 1】



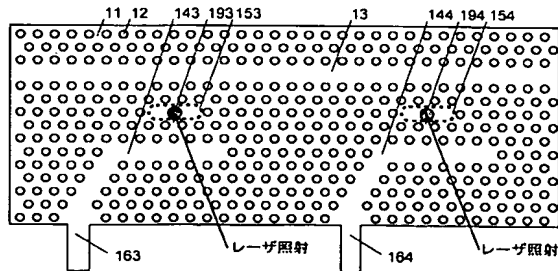
【図 3】



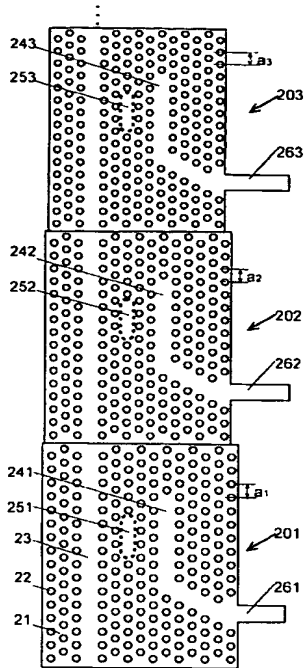
【図 2】



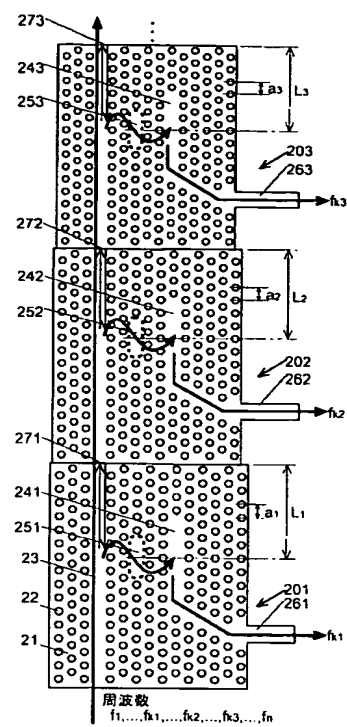
【図 4】



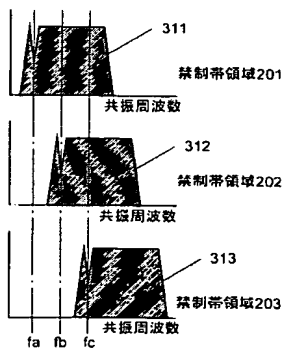
【図 5】



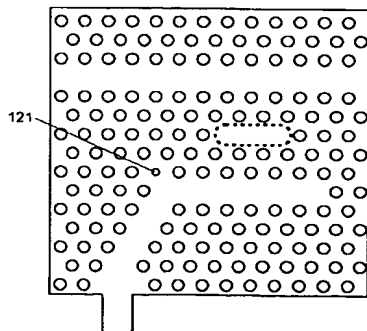
【図 6】



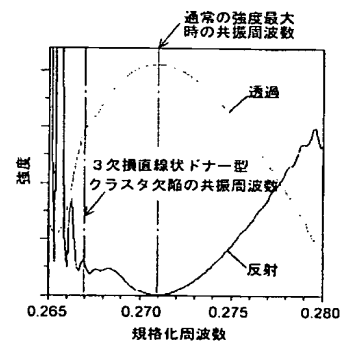
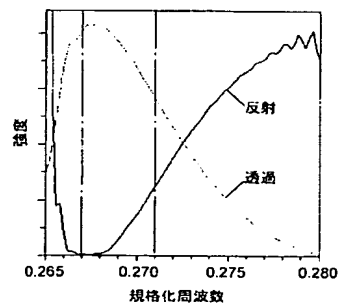
【図 7】



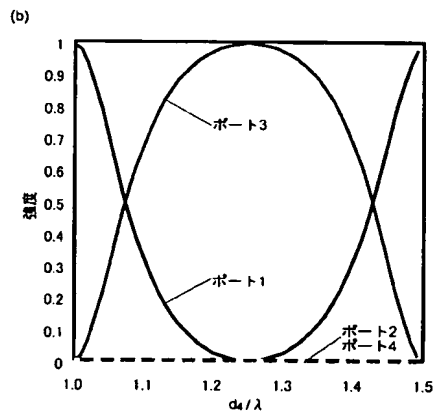
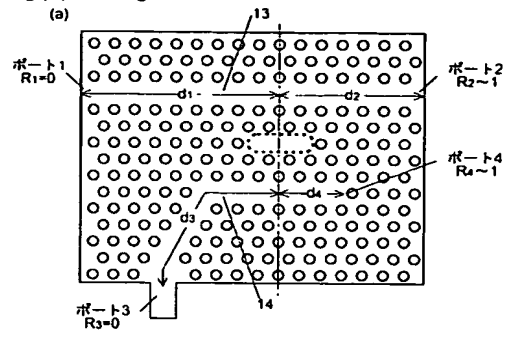
【図 8】



【図 9】

(a) 曲げ部空孔の半径 $r=0.29$ (通常)(b) $r=0.23$ 

【図 10】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
	G 0 2 B 6/12	N
	G 0 2 B 6/12	H

(72)発明者 浅野 卓

京都市山科区安朱東海道町 1 6 の 1 緑山荘 A-2 0 7

(72)発明者 高野 仁路

大阪府門真市大字門真 1 0 4 8 番地 松下電工株式会社内

F ターム(参考) 2H047 KA03 KA12 LA18 NA01 RA00

2H048 AA07 AA12 AA18 AA23

2H079 CA07 EA01 KA08

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2004-212416

(43)Date of publication of application : 29.07.2004

(51)Int.Cl.

G02B 6/12

G02B 5/20

G02F 1/01

(21)Application number : 2002-378438

(71)Applicant : JAPAN SCIENCE & TECHNOLOGY
AGENCY
MATSUSHITA ELECTRIC WORKS LTD

(22)Date of filing : 26.12.2002

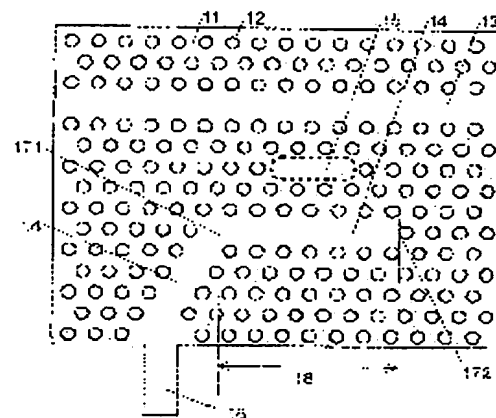
(72)Inventor : NODA SUSUMU
ASANO TAKU
TAKANO KIMIMICHI

(54) ELECTROMAGNETIC WAVE FREQUENCY FILTER

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an electromagnetic wave frequency filter capable of transferring an electromagnetic wave having a prescribed frequency between two waveguides at high efficiency.

SOLUTION: A resonator 15 which resonates to the electromagnetic wave having the prescribed frequency is arranged between an input waveguide 13 and an output waveguide 14 by being made to be close to both waveguides 13, 14. The output waveguide 14 is made to be parallel with the input waveguide 13 in a prescribed extent 18 near the resonator 15 and is made so that the distance with the input waveguide 13 becomes longer than that in the prescribed extent 18 in extents other than the extent 18. As a result, the electromagnetic wave having the prescribed frequency is transferred between the waveguide 13 and the waveguide 14 through the resonator 15. On the other hand, it is suppressed that electromagnetic waves other than the prescribed frequency which become noise are transferred between the waveguide 13 and the waveguide 14 in the extents other than the prescribed extent 18. This electromagnetic wave frequency filter can be suitably constituted using a two-dimensional photonic crystal.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 18.04.2003

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3692354

BEST AVAILABLE COPY

[Date of registration] 24.06.2005
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of extinction of right]

*** NOTICES ***

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1]

- a) Input waveguide which guides an electromagnetic wave,
- b) Output waveguide which is the waveguide which guides an electromagnetic wave, and is arranged so that distance with said input waveguide in the predetermined range of the longitudinal direction may become smaller than distance with said input waveguide outside said predetermined range,
- c) The resonator which is arranged at said predetermined within the limits between said input waveguides and output waveguides, and resonates on the electromagnetic wave of a predetermined frequency, The electromagnetic-wave-frequency filter characterized by preparation *****.

[Claim 2]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 1 characterized by having two or more [of said output waveguide], and having the resonator which is between each output waveguide and said input waveguide, and resonates on the electromagnetic wave of a predetermined frequency for every output waveguide at predetermined within the limits.

[Claim 3]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 2 characterized by the resonance frequency of the resonator for said every output waveguide differing respectively.

[Claim 4]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 1 to 3 characterized by both said input waveguide, and output both [either or] having a flection at the end of said predetermined range.

[Claim 5]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 4 characterized by containing the resonance frequency of said resonator in the high permeability frequency band of said flection.

[Claim 6]

- a) The two-dimensional photograph nick crystal which prepared the field where a refractive index differs from two or more bodies periodically arranged by the slab-like body,
- b) Input waveguide formed by preparing the defect of said different refractive-index field in a line,
- c) Output waveguide which is the waveguide formed by preparing the defect of said different refractive-index field in a line, and is arranged so that distance with said input waveguide in the predetermined range of the longitudinal direction may become smaller than distance with said input waveguide outside said predetermined range,
- d) The resonator which consists of the punctiform defect which is arranged at said predetermined within the limits between said input waveguides and output waveguides, and resonates on the electromagnetic wave of a predetermined frequency, The electromagnetic-wave-frequency filter characterized by preparation *****.

[Claim 7]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 6 characterized by being the donor mold punctiform defect formed when said punctiform defect makes a different refractive-index field suffer a loss.

[Claim 8]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 6 or 7 characterized by having two or more [of said output waveguide], and having the resonator which is between each output waveguide and said input waveguide, and resonates on the electromagnetic wave of a predetermined frequency for every output waveguide at predetermined within the limits.

[Claim 9]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 8 characterized by the resonance frequency of the resonator for said every output waveguide differing respectively.

[Claim 10]

- a) The hetero structure two-dimensional photograph nick crystal within a field which prepared two or more forbidden-band fields in the slab-like body, and prepared the field where a refractive index differs from two or more bodies periodically arranged by the body a period which is different for every forbidden-band field in each forbidden-band field,
- b) Input waveguide which is formed by establishing the defect of said different refractive-index field in each forbidden-band field at a line, and passes through all forbidden-band fields,
- c) Output waveguide which is the waveguide formed by preparing the defect of said different refractive-index field in a line for every forbidden-band field, and is arranged so that distance with said input waveguide in the predetermined range of the longitudinal direction may become smaller than distance with said input waveguide outside said predetermined range,
- d) The resonator which consists of the punctiform defect which is arranged at said predetermined within the limits between said input waveguides and output waveguides, and resonates on the electromagnetic wave of a predetermined frequency,

The electromagnetic-wave-frequency filter characterized by preparation *****.

[Claim 11]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 10 characterized by being the donor mold punctiform defect formed when said punctiform defect makes a different refractive-index field suffer a loss.

[Claim 12]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 10 or 11 characterized by including a part of transparency frequency band of the input waveguide in each forbidden-band field in no input waveguide transparency frequency band of the forbidden-band fields in one of the forbidden-band field side, but being contained in the input waveguide transparency frequency band of all the forbidden-band fields located with it in the opposite side, and containing the resonance frequency in said resonator formed in each forbidden-band field in said some of transparency frequency bands.

[Claim 13]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 12 characterized by setting up so that the phase contrast of the electromagnetic wave which has the resonance frequency of the resonator of that forbidden-band field, and is reflected with this resonator in said each forbidden-band field in the distance between the resonators belonging to one [said] near interface and its near forbidden-band field with a contiguity forbidden-band field, and the electromagnetic wave which passes this punctiform defect on this frequency, and is reflected in a forbidden-band field interface may be set to π .

[Claim 14]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 12 or 13 characterized by being the straight-line-like donor mold cluster defect formed by making three different refractive-index fields where said punctiform defect adjoins in the shape of a straight line suffer a loss.

[Claim 15]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 6 to 14 characterized by both said input waveguide, and output both [either or] having a flection at the end of said predetermined range.

[Claim 16]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 15 with which resonance frequency of said resonator is characterized by being contained in the high permeability frequency band of said flection.

[Claim 17]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 16 with which the different refractive-index field in said flection is characterized by different thing in either of a refractive index, a period, a configuration, or magnitude at least from other different refractive-index fields.

[Claim 18]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 6 to 17 characterized by some or all of said at least one resonator consisting of the ingredient from which a refractive index changes with the operations from the outside.

[Claim 19]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 1 to 18 characterized by setting up the distance between a resonator and the reflective section so that the phase contrast of the electromagnetic wave which prepares the reflective section which reflects in said output waveguide the electromagnetic

wave which has the resonance frequency of said resonator, and is introduced into output waveguide from a resonator, and the electromagnetic wave reflected by the reflective section may be set to 0.

[Claim 20]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 1 to 18 characterized by setting up the distance between a resonator and the reflective section so that the phase contrast of the electromagnetic wave which prepares the reflective section which reflects in said output waveguide the electromagnetic wave which has the resonance frequency of said resonator, and is reflected by the resonator, and the electromagnetic wave reflected by the reflective section may be set to π .

[Claim 21]

The flection which said reflective section prepared in the edge of output waveguide, and the edge of said predetermined range, the flection prepared in locations other than the edge of the predetermined range, and the electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 19 or 20 with which it is characterized by consisting of either of the interfaces with one [said] near contiguity forbidden-band field.

[Claim 22]

The electromagnetic-wave-frequency filter according to claim 1 to 21 characterized by said at least one resonator emitting a part of resonating electromagnetic wave to the exterior.

[Translation done.]

*** NOTICES ***

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention]

This invention relates to the frequency filter which takes out a predetermined light and the predetermined electromagnetic wave of a frequency from waveguide. This frequency filter is used in the field of optical communication etc.

[0002]

[Description of the Prior Art]

In optical communication, in order to increase the amount of information which can be transmitted to unit time amount, one transmission line is made to spread the light of two or more wavelength (frequency), and the wavelength division multiplexing which puts a separate signal on each is used. In this wavelength division multiplexing, the light of each wavelength is mixed by the entrance side of a transmission line, and the mixed light is taken out for every wavelength by the outlet side. Therefore, the multiplexing machine and splitter, or wavelength filter (frequency filter) of light is needed.

[0003]

As for current, the array waveguide diffraction grating is used as such a splitter. However, in an array waveguide diffraction grating, quartz system optical waveguide is used, and in order to make loss of light small, in the present condition, what has several big cm angle extent usually must be used. Then, in order to attain the miniaturization of a splitter, the frequency filter which used the photograph nick crystal is examined.

[0004]

A photograph nick crystal is an optical functional material with periodic refractive-index distribution, and band structure is formed to the energy of a photon. It is the description that the energy field (photograph nick band gap) whose propagation of light becomes impossible especially is formed. By introducing a defect suitable during this photograph nick crystal, the energy level (defective level) by this defect is formed into a photograph nick band gap. By this, the existence only of the light of the frequency corresponding to the energy of defective level is attained among the frequency ranges corresponding to the energy in the above-mentioned photograph nick band gap. If the above-mentioned defect under crystal is made into a line, it will become the optical waveguide which spreads the light of a predetermined frequency, and if the defect under crystal is made into punctiform, it will become the optical resonator which resonates in the light of a predetermined frequency.

[0005]

In the two-dimensional photograph nick crystal which prepared periodic refractive-index distribution in the patent reference 1 by arranging a cylinder hole periodically in the shape of a triangular grid, what ([0029] drawing 1) waveguide is formed ([0025] drawing 1) and a point defect is formed for near the waveguide is indicated by by making this cylinder hole suffer a loss to a line. In the patent reference 1, the point defect formed by enlarging the path of the cylinder hole periodically arranged as an example is examined. The splitter which takes out outside the light which has the resonance frequency of a point defect by this configuration among the light which spreads waveguide, and the multiplexing machine which introduces into waveguide from the exterior the light which has the resonance frequency of a point defect are produced.

[0006]

[Patent reference 1]

JP,2001-272555,A ([0025], [0029], drawing 1)

[0007]

Moreover, invention-in-this-application persons have proposed forming a cluster defect in application-for-patent No. 086221 [2002 to] application by making into a defect two or more different refractive-index fields which adjoin among the different refractive-index fields which form periodic refractive-index distribution. The defect of a different refractive-index field forms the refractive index of the different refractive-index field by differing from the refractive index of other different refractive-index fields here. What has a refractive index higher than other different refractive-index fields is called a donor mold defect, and a low thing is called an acceptor mold defect. The defect formed by enlarging a cylinder hole given in said patent reference 1 is an acceptor mold defect, and the defect formed by not preparing a different refractive-index field is a donor mold defect. A cluster defect and the point defect which only one different refractive-index field is made to suffer a loss, and is formed are generically called a "punctiform defect."

[0008]

In said application-for-patent No. 086221 [2002 to] application, invention-in-this-application persons had two or more forbidden-band fields which have arranged the different refractive-index field a period different further, respectively, and have proposed the terrorism structure two-dimensional photograph nick crystal into the field which prepared the punctiform defect in each forbidden-band field. Also when this establishes the punctiform defect of the same configuration as each forbidden-band field, each point-like defect resonates in the light of a different frequency by the difference in the period of a different refractive-index field, respectively.

[0009]

In the patent reference 1 and the wavelength part multiplexing machine of application-for-patent No. 086221 [2002 to] application, installation and ejection of light are performed between waveguide and the exterior through the punctiform defect. On the other hand, what two straight-line waveguides are prepared in a two-dimensional photograph nick crystal, and a punctiform defect is established for between these two straight-line waveguides (refer to drawing 3 of the patent reference 2 and drawing 8) is indicated by the patent reference 2. By this configuration, the light which has the resonance frequency of a punctiform defect is introduced into the waveguide of another side from one waveguide. This serves as a multiplexing machine. Moreover, the light which two or more frequencies superimposed on one waveguide is made to spread, and it also becomes the splitter which takes out only the light of a predetermined frequency from there to the waveguide of another side.

[0010]

[Patent reference 2]

** table No. 508887 [2001 to] official report (drawing 3, drawing 8)

[0011]

[Problem(s) to be Solved by the Invention]

If distance between waveguide and a punctiform defect is made small to extent to which transfer of light is performed among both, transfer of light will be performed between two waveguides. For this reason, in the configuration of the patent reference 2, transfer of the light which also contains components other than a predetermined frequency between two waveguides in locations other than a punctiform defect arose, and there was a problem that the cross talk of a signal happened.

[0012]

Although the optical separator and optical multiplexing machine using a two-dimensional photograph nick crystal were described as an example so far, also not only to light but to an electromagnetic wave, it is the same and the same problem arises also in the optical frequency filter (wavelength filter) and electromagnetic-wave-frequency filter which have configurations other than a two-dimensional photograph nick crystal. In addition, light shall be included when it is indicated as an "electromagnetic wave" below.

[0013]

The place which accomplishes this invention in order to solve such a technical problem, and is made into the purpose is to offer the electromagnetic-wave-frequency filter which can deliver and receive the electromagnetic wave of a frequency predetermined between two waveguides at high effectiveness.

[0014]

[Means for Solving the Problem]

The electromagnetic-wave-frequency filter concerning this invention accomplished in order to solve the above-mentioned technical problem,

a) Input waveguide which guides an electromagnetic wave,

b) Output waveguide which is the waveguide which guides an electromagnetic wave, and is arranged so that

distance with said input waveguide in the predetermined range of the longitudinal direction may become smaller than distance with said input waveguide outside said predetermined range,
 c) The resonator which is arranged at said predetermined within the limits between said input waveguides and output waveguides, and resonates on the electromagnetic wave of a predetermined frequency,
 It is characterized by preparation *****.

[0015]

This electromagnetic-wave-frequency filter can be constituted using a two-dimensional photograph nick crystal. The electromagnetic-wave-frequency filter using the two-dimensional photograph nick crystal concerning this invention,

- a) The two-dimensional photograph nick crystal which prepared the field where a refractive index differs from two or more bodies periodically arranged by the slab-like body,
- b) Input waveguide formed by preparing the defect of said different refractive-index field in a line,
- c) Output waveguide which is the waveguide formed by preparing the defect of said different refractive-index field in a line, and is arranged so that distance with said input waveguide in the predetermined range of the longitudinal direction may become smaller than distance with said input waveguide outside said predetermined range,
- d) The resonator which consists of the punctiform defect which is arranged at said predetermined within the limits between said input waveguides and output waveguides, and resonates on the electromagnetic wave of a predetermined frequency,
 It is characterized by preparation *****.

[0016]

Moreover, this electromagnetic-wave-frequency filter can also be constituted using the two-dimensional photograph nick crystal which has the hetero structure within a field. The electromagnetic-wave-frequency filter using the two-dimensional photograph nick crystal which has the hetero structure within a field concerning this invention,

- a) The hetero structure two-dimensional photograph nick crystal within a field which prepared two or more forbidden-band fields in the slab-like body, and prepared the field where a refractive index differs from two or more bodies periodically arranged by the body a period which is different for every forbidden-band field in each forbidden-band field,
- b) Input waveguide which is formed by establishing the defect of said different refractive-index field in each forbidden-band field at a line, and passes through all forbidden-band fields,
- c) Output waveguide which is the waveguide formed by preparing the defect of said different refractive-index field in a line for every forbidden-band field, and is arranged so that distance with said input waveguide in the predetermined range of the longitudinal direction may become smaller than distance with said input waveguide outside said predetermined range,
- d) The resonator which consists of the punctiform defect which is arranged at said predetermined within the limits between said input waveguides and output waveguides, and resonates on the electromagnetic wave of a predetermined frequency,
 It is characterized by preparation *****.

[0017]

In the electromagnetic-wave-frequency filter using a terrorism structure two-dimensional photograph nick crystal into this field A part of transparency frequency band of the input waveguide in each forbidden-band field is included in no input waveguide transparency frequency band of the forbidden-band fields in one of the forbidden-band field side. As for it, it is desirable to be contained in the input waveguide transparency frequency band of all the forbidden-band fields in the opposite side, and to contain the resonance frequency in said resonator formed in each forbidden-band field in said some of transparency frequency bands.

[0018]

[Embodiment of the Invention]

(1) The electromagnetic-wave-frequency filter concerning this invention

The electromagnetic-wave-frequency filter of this invention has the resonator which resonates on the electromagnetic wave of one specific frequency component between input waveguide and output waveguide. Although it is the same as that of the electromagnetic-wave-frequency filter of the patent reference 2 that this electromagnetic-wave-frequency filter is equipped with these three components, in this invention, it has the description in these three physical relationship. It is making it the distance between input waveguide and output waveguide become the smallest in the predetermined range, and forming a resonator between the input waveguide of this predetermined within the limits, and output waveguide.

[0019]

The reason considered as such a configuration is as follows. When input waveguide and a resonator join together in energy and a resonator and output waveguide join together in energy similarly, in this electromagnetic-wave-frequency filter, the electromagnetic wave which has the resonance frequency of a resonator between input waveguide and output waveguide is delivered and received. In order to enlarge reinforcement of the electromagnetic wave delivered and received, it is desirable to make small distance between input waveguide-resonators and between resonator-output waveguides, and to strengthen energy-association. Therefore, in the range in which a resonator exists, the smaller one of the distance between input waveguide and output waveguide is desirable. On the other hand, if distance between input waveguide and output waveguide is made small, the reinforcement of the electromagnetic wave delivered and received directly, without minding a resonator will increase. Since the electromagnetic wave which has frequencies other than the resonance frequency of a resonator is also delivered and received, this is not desirable. In order to avoid it, the larger one of the distance between input waveguide and output waveguide is desirable in addition to the range where a resonator exists. In order to fulfill both these two conditions, the electromagnetic-wave-frequency filter of this invention was considered as the aforementioned configuration.

[0020]

By this configuration, it can use as a splitter which separates the electromagnetic wave of a predetermined frequency spectrally into output waveguide from input waveguide. It can also use as a multiplexing machine which introduces the electromagnetic wave of a predetermined frequency into "input waveguide" from "output waveguide". [in / for the same electromagnetic-wave-frequency filter of a configuration as this splitter / a splitter] In this case, the "output waveguide" of a splitter turns into input waveguide of a multiplexing machine, and the "input waveguide" of a splitter turns into output waveguide of a multiplexing machine. In addition, when "input waveguide" and "output waveguide" do not have a special publication in this specification, the input waveguide and output waveguide of a splitter are pointed out.

[0021]

What has the configuration in which both input waveguide, and output both [either or] are crooked with an include angle as a typical configuration of the input waveguide of this invention and output waveguide on the boundary of said predetermined range can be mentioned. Moreover, a flection is not prepared but you may make it bend smoothly both input waveguide, and output both [either or] outside the predetermined range.

[0022] In the
 flection, not all the electromagnetic waves that pass through said predetermined range of waveguide necessarily pass. Unlike frequency dependent [of the permeability of the electromagnetic wave in said predetermined range of waveguide], it depends on the structure of a flection for frequency dependent [of the permeability of the electromagnetic wave which penetrates a flection]. The electromagnetic wave of the frequency can be efficiently passed by optimizing the structure of a flection and the resonance frequency of a resonator being made to be contained in the high permeability frequency band which has the permeability beyond a predetermined value using this. Moreover, in a flection, the electromagnetic wave used as noises other than predetermined frequency can be made hard to pass, and a noise can be reduced.

[0023]

Furthermore, since the edge of output waveguide can be separated from input waveguide, it becomes possible to arrange the edge of output waveguide in a desired location. This was impossible in the output waveguide of the shape of a straight line of the patent reference 2.

[0024]

Two or more output waveguides may be prepared to one input waveguide. In this case, a resonator is formed between input waveguides for every output waveguide. By resonating on the electromagnetic wave of the frequency from which each resonator differs, the electromagnetic wave of a frequency different, respectively can be delivered and received between the input waveguide and each output waveguide which the electromagnetic wave which two or more different frequencies superimposed spreads. In addition, according to the configuration of the patent reference 2, since output waveguide has the shape of a straight line parallel to input waveguide, two or more output waveguides cannot be prepared.

[0025]

Spectral separation effectiveness or multiplexing effectiveness can be raised by preparing the reflective section in the side which does not perform the in-and-out force of an electromagnetic wave of output waveguide, and setting up the distance between a resonator and the reflective section appropriately. Such the

reflective section can be formed establishing the dead end (edge) in output waveguide, and by preparing a flection. The flection used as the reflective section here may be said flection prepared in the boundary of the predetermined range, and may be prepared apart from it.

[0026]

It is desirable in the case of a splitter, to set up the distance between a resonator and the reflective section so that the phase contrast of the electromagnetic wave spread to the opposite side (I/O side) of the reflective section among the electromagnetic waves introduced into output waveguide from a resonator and the electromagnetic wave which it is reflected in the reflective section and spread to an I/O side may be set to 0. Thereby, these two electromagnetic waves suit in slight strength by interference, and reinforcement of the electromagnetic wave taken out can be strengthened. In addition, in case an electromagnetic wave is reflected in the reflective section, a phase may change with the configurations of the reflective section. When a phase is reversed in the case of this reflection, distance between a resonator and the reflective section is made into $(2n-1)$ of resonant wavelength / 4 times (n is the same a positive integer and the following). On the other hand, this distance is made into $n/2$ twice resonant wavelength when a phase does not change in the case of reflection.

[0027]

It is desirable in the case of a multiplexing machine, to set up the distance between a resonator and the reflective section so that the phase contrast of the electromagnetic wave reflected with a resonator among the electromagnetic waves which face to a resonator from the input waveguide (output waveguide of a splitter) of a multiplexing machine, and the electromagnetic wave which passes a resonator and is reflected in the reflective section may be set to π . Thereby, these two reflected waves weaken each other by interference, and can strengthen reinforcement of the electromagnetic wave introduced into a resonator. In addition, as well as the case of the reflective section in case an electromagnetic wave is reflected with a resonator, a phase may change with the configurations of a resonator. This distance is made into $(2n-1)$ of resonant wavelength / 4 times, when the phase of an electromagnetic wave is [in / both / a resonator and the reflective section / neither of] reversed or a phase changes. Moreover, this distance is made into $n/2$ twice resonant wavelength, when the phase of an electromagnetic wave is reversed only in one reflection of a resonator or the reflective section and a phase does not change in reflection of another side.

[0028]

(2) The electromagnetic-wave-frequency filter concerning this invention using a two-dimensional photograph nick crystal

Although the electromagnetic-wave-frequency filter described so far can also be constituted using the electromagnetic wave filter which used the dielectric waveguide and the ring resonator, it is suitable for it to use the two-dimensional photograph nick crystal described below in that loss of an electromagnetic wave can attain the miniaturization of equipment few.

[0029]

The two-dimensional photograph nick crystal electromagnetic-wave-frequency filter of this invention uses as a body the slab which is a plate with sufficiently thin thickness compared with the magnitude of field inboard, and uses as a parent the two-dimensional photograph nick crystal constituted by arranging periodically the field where a refractive index differs from it on this body. In the two-dimensional photograph nick crystal of this parent, a photograph nick band gap is formed of existence of a periodic different refractive-index field, and an electromagnetic wave with the energy within the limits of it cannot be existed. That is, the electromagnetic wave of the frequency band corresponding to it cannot pass a body. As an ingredient of a body, Si and InGaAsP can be used, for example. Although a different refractive-index field is a field which consists of an ingredient which has the refractive index from which a body differs, it has the cylinder hole indicated by said patent reference 1 as an example of a type. If it is a cylinder hole, it is [that what is necessary is just to open a hole in a body] easily producible rather than it arranges a certain member on a body.

[0030]

If a defect is prepared in a part of different refractive-index field periodically arranged in a body, periodicity will be disturbed there. By setting up parameters, such as a refractive index of a defect, and magnitude, appropriately, defective level can be formed into a photograph nick band gap, and the electromagnetic wave of the frequency corresponding to the energy of this defective level can exist now in the location of a defect. By preparing this defect in a line continuously, the waveguide which penetrates the electromagnetic wave of the fixed frequency range in a photograph nick band gap can be formed. In this invention, input waveguide and output waveguide are formed so that both distance may become the smallest in the predetermined range.

[0031]

It is said predetermined within the limits, and a punctiform defect is prepared in the different refractive-index field between input waveguide and output waveguide. Any of the aforementioned point defect and a cluster defect are sufficient as this punctiform defect, and any of the aforementioned acceptor mold and a donor mold sufficient as it. By setting up parameters, such as a class of punctiform defect, magnitude, and a location, appropriately, predetermined defective level is formed into a photograph nick band gap, and only the electromagnetic wave of the frequency corresponding to the energy of defective level resonates in a defective location. That is, this punctiform defect serves as a resonator.

[0032]

By this configuration, the electromagnetic wave which has the resonance frequency of a resonator between input waveguide and output waveguide can be delivered and received. It can prevent delivering and receiving directly the electromagnetic wave which has the other frequency with it between input waveguide and output waveguide.

[0033]

In order to control that an electromagnetic wave leaks in the direction perpendicular to the crystal face from a resonator, and it is lost, as for a resonator, it is desirable that it is the donor mold punctiform defect who made the different refractive-index field suffer a loss.

[0034]

By preparing a flection in the boundary of said predetermined range of input waveguide or output waveguide, the distance of both waveguides can become the smallest in the predetermined range. The transparency frequency band of this flection is controllable by adjusting at least one parameter among the refractive index of the different refractive-index field in this flection, a period, a configuration, and magnitude. The electromagnetic wave of the other frequency can be made hard to be easy to pass the electromagnetic wave which has the resonance frequency of a resonator in this flection using this, and to pass. Thereby, a flection plays the role which reduces the electromagnetic wave used as noises other than the predetermined frequency in output waveguide.

[0035]

Also in a two-dimensional photograph nick crystal, spectral separation effectiveness or multiplexing effectiveness can be raised like the above by preparing the reflective section which changes from an edge, a flection, etc. to the opposite side by the side of the in-and-out force of the electromagnetic wave of output waveguide, and setting up the distance between a resonator and the reflective section appropriately. The conditions of this distance are the same as that of the above. In addition, in case an electromagnetic wave is reflected by the punctiform defect of a two-dimensional photograph nick crystal, in order to reverse the phase of an electromagnetic wave, it is necessary to set up the distance between the resonator-reflective sections in a multiplexing machine in consideration of the phase change of the electromagnetic wave reflected in the reflective section.

[0036]

It is the same as that of the above that the electromagnetic wave of single frequency different, respectively can be delivered and received between input waveguide and each output waveguide by preparing two or more output waveguides and forming the resonator which resonates on the electromagnetic wave of a different frequency for every output waveguide.

[0037]

There is an ingredient with the property in which a refractive index changes with the operations from the outside, such as light, a pressure, and heat. For example, in semi-conductors, such as an InGaAsP system and an InGaAlAsP system, that from which the density of electric charge changes and a refractive index changes exists by irradiating laser according to the band filling effectiveness of a quantum well. If such an ingredient is used for some or all of a resonator (punctiform defect), the resonance frequency in a resonator will change with change of the refractive index by external operation. This can deliver and receive the electromagnetic wave of a predetermined frequency between input waveguide and output waveguide only during external operation impression. It can avoid delivering and receiving the electromagnetic wave of predetermined frequency during external operation impression contrary to it. These play the role of the switch which carries out ON/OFF of the ejection (in the case of a splitter) to output waveguide, or the installation (in the case of a multiplexing machine) according to an external operation. Furthermore, the frequency of the electromagnetic wave delivered and received is also controllable by adjusting the strength of an external operation.

[0038]

The output waveguide which delivers and receives an electromagnetic wave can be chosen by impression of an external operation by preparing two or more output waveguides and preparing these refractive-index variant part material for every resonator. If the resonator of resonance frequency which is different in two or more output waveguides, respectively is formed near the waveguide, output waveguide can be chosen according to an external operation, and the frequency of an output electromagnetic wave can be chosen. If the resonator of the same resonance frequency is formed in two or more output waveguides near the waveguide to it, the output electromagnetic wave of the same frequency can be outputted from different output waveguide.

[0039]

As mentioned above, although it is desirable to control since an electromagnetic wave's leaking in the direction perpendicular to the crystal face from a resonator is lost, it may be useful to make an electromagnetic wave reveal slightly from a resonator intentionally. For example, the reinforcement of the electromagnetic wave delivered and received between input waveguide and output waveguide can be measured by measuring the revealed electromagnetic wave.

[0040]

(3) The electromagnetic-wave-frequency filter applied to this invention using a terrorism structure two-dimensional photograph nick crystal into a field

The electromagnetic-wave-frequency filter of this invention is constituted as follows using a terrorism structure two-dimensional photograph nick crystal into the field proposed in said application-for-patent No. 086221 [2002 to] application. A body is divided into the field of the same number as the number of the classes of frequency which carries out part multiplexing. This field is called a forbidden-band field. A different refractive-index field is arranged a different period for every forbidden-band field, and a common forbidden-band field is formed. Input waveguide is formed by preparing the defect of a different refractive-index field in a line continuously so that it may pass along all the forbidden-band fields. For every forbidden-band field, output waveguide is prepared so that distance with input waveguide may become the smallest in the predetermined range. A punctiform defect (resonator) is prepared in said predetermined within the limits between each output waveguide and input waveguide. As for this punctiform defect, it is desirable that it is a donor mold punctiform defect like the above. Since it is dependent on the period of a different refractive-index field, resonance frequency can control the frequency of the electromagnetic wave introduced into each output waveguide (in the case of a splitter) by setting up the period of a different refractive-index field for every forbidden-band field.

[0041]

Furthermore, it is desirable to make it a forbidden-band field located in a line with the ascending order or descending order of resonance frequency in the direction which an electromagnetic wave spreads in input waveguide. In arranging a forbidden-band field in the ascending order of resonance frequency, it makes the period of a different refractive-index field small at the order, and in arranging a forbidden-band field in descending order, it enlarges the period of a different refractive-index field at the order. It can avoid including a part of transparency frequency band of the input waveguide in each forbidden-band field by this in the input waveguide transparency frequency band of the forbidden-band field which adjoins in the direction of superposition wave propagation. The resonator which makes resonance frequency this frequency contained in part in a transparency frequency band is formed for every forbidden-band field. On a boundary with a contiguity forbidden-band field, total reflection of the electromagnetic wave passed in the splitter by this, without being introduced into a punctiform defect among the electromagnetic waves corresponding to the resonance frequency of a punctiform defect is carried out, and it returns to the punctiform defect again. Therefore, the rate of the electromagnetic wave introduced into output waveguide through this resonator can be made high, and spectral separation effectiveness can be improved. In a multiplexing machine, effectiveness can be improved similarly.

[0042]

Spectral separation effectiveness or multiplexing effectiveness can be raised by preparing the reflective section like the above also in a terrorism structure two-dimensional photograph nick crystal in the opposite side by the side of the in-and-out force of the electromagnetic wave of output waveguide into a field, and setting up the distance between a resonator and the reflective section appropriately. The conditions of this distance are the same as that of the above. that to which the reflective section in this case changes from an aforementioned edge, an aforementioned flection, etc. of output waveguide -- in addition, what prepared output waveguide to the boundary with the contiguity forbidden-band field which does not penetrate the

electromagnetic wave of the resonance frequency of that resonator, and made that boundary the reflective section may be used.

[0043]

it be applicable similarly into a field that ON/OFF of the ejection of the electromagnetic wave to output waveguide or the installation can be carry out and that the reinforcement of the electromagnetic wave deliver and receive between input waveguide and each output waveguide by detect the leakage of the electromagnetic wave from a resonator be detectable to a terrorism structure two-dimensional photograph nick crystal electromagnetic wave frequency filter by use for a resonator the ingredient from which a refractive index change with external operations .

[0044]

[Effect of the Invention]

It is high effectiveness, and the electromagnetic wave of a predetermined frequency can be delivered [within the limits of predetermined / in which a resonator exists / by carrying out near of the distance between input waveguide and output waveguide, and other than this making both distance far then] like this invention and received between input waveguide and output waveguide through a resonator. It can prevent delivering and receiving electromagnetic waves other than predetermined frequency among both waveguides with it. Moreover, in this invention, since the edge of output waveguide can be separated from input waveguide, it becomes possible to arrange the edge of output waveguide in a desired location, and it can output the electromagnetic wave of predetermined frequency to a desired location.

[0045]

As for this electromagnetic-wave-frequency filter, it is desirable to constitute using a two-dimensional photograph nick crystal. It can prevent an electromagnetic wave's leaking from a resonator to the exterior, and being lost in the case of transfer of the electromagnetic wave of input waveguide and output waveguide, by using a donor mold punctiform defect for a resonator especially. Moreover, the reinforcement of the electromagnetic wave which is made to reflect the electromagnetic wave of the predetermined frequency which penetrates input waveguide on a forbidden-band field boundary using the hetero structure two-dimensional photograph nick crystal within a field, and is introduced into a resonator by things can be raised, and the effectiveness of transfer with input waveguide and output waveguide can be raised.

[0046]

[Example]

As one example of the electromagnetic-wave-frequency filter concerning this invention, the example of 1 configuration of the electromagnetic wave (light) frequency filter which used the two-dimensional photograph nick crystal for drawing 1 is shown. On a body 11, the hole 12 which is a different refractive-index field is periodically arranged in the shape of a triangular grid. The input waveguide 13 is formed by making a hole 12 suffer a loss to a line. By making a hole 12 suffer a loss to a line similarly, in the predetermined range 18, the output waveguide 14 is formed so that it may separate from the input waveguide 13 in the other range in parallel with the input waveguide 13. The external waveguide 16 is connected to one edge of the output waveguide 14. The thin line waveguide which consists of the same ingredient as a body 11 can be used for the external waveguide 16. A trailer 172 is formed in the other end of the output waveguide 14 by what a hole 12 is formed for (the deficit of a hole 12 is not prepared). A trailer 172 serves as one edge of the predetermined range 18. The flection 171 of the output waveguide 14 is formed in the other end of the predetermined range 18. It is in the predetermined range 18 and the punctiform defect 15 is formed between the input waveguide 13 and the output waveguide 14. Here, the straight-line-like donor mold cluster defect formed by making three holes suffer a loss in the shape of a straight line is used.

[0047]

Actuation of the electromagnetic-wave-frequency filter of drawing 1 is explained using drawing 2 . To the input waveguide 13, two or more frequencies f_1 and the electromagnetic wave which f_2, \dots, f_n superimposed spread. Among these, the electromagnetic wave of the resonance frequency f_k of the punctiform defect 15 is introduced into the output waveguide 14 through the punctiform defect 15. The electromagnetic wave introduced into the output waveguide 14 is taken out by the external waveguide 16 through a flection 171.

[0048]

In this configuration, when making it the input waveguide 13 and the output waveguide 14 not approach in range other than said predetermined range 18, it can control that transfer of the electromagnetic wave containing components other than a frequency predetermined between two waveguides arises. Moreover, since the punctiform defect 15 is a donor mold punctiform defect, it can control that an electromagnetic

wave leaks out outside the field of a two-dimensional photograph nick crystal, and is lost.

[0049]

Other examples of a configuration of the electromagnetic-wave-frequency filter which used the two-dimensional photograph nick crystal for drawing 3 are shown. Two or more output waveguides are prepared in the photograph nick crystal which formed a body 11, a hole 12, and the input waveguide 13 like the electromagnetic-wave-frequency filter of drawing 1 (the output waveguides 141 and 142, ...), it connects with it at them, and the external waveguides 161 and 162 and ... are prepared. The punctiform defects 151 and 152 and ... which have resonance frequency different, respectively are prepared between each output waveguides 141 and 142, and ... and the input waveguide 13. Here, the example which uses a straight-line-like 3 defective donor mold cluster defect for the punctiform defect 151, and uses a triangle-like 3 defective donor mold cluster defect for the punctiform defect 152 is shown. In addition, although 2 sets of output waveguides, external waveguide, and a punctiform defect were shown in drawing 3, even if it is the case where these are 3 or more sets, it can constitute similarly.

[0050]

Each point-like defects 151 and 152 and the electromagnetic wave which has the resonance frequency of ... are introduced into the output waveguides 141 and 142 and .. through each point-like defect by this configuration among two or more frequencies f_1 which spread the input waveguide 13, and the electromagnetic wave which f_2 , ..., f_n superimposed. This plays the role of the electromagnetic-wave-frequency filter which extracts two or more electromagnetic waves which have a different frequency to output waveguide.

[0051]

Other examples of a configuration of the electromagnetic-wave-frequency filter which used the two-dimensional photograph nick crystal for drawing 4 are shown. A body 11, a hole 12, the input waveguide 13, two or more output waveguides (143, 144, ...), and external waveguide (163, 164, ...) are prepared like the electromagnetic-wave-frequency filter of drawing 3. In this example of a configuration, the same refractive-index variant part material 193 and 194 which consists of the ingredient of the InGaAsP system from which a refractive index changes, or an InGaAlAsP system, the same punctiform defects 153 and 154 which embedded ..., and ... are prepared by irradiating laser between all the output waveguides 143 and 144, and ... and the input waveguide 13.

[0052]

The resonance frequency of the punctiform defects 153 and 154 becomes f_1' , when not irradiating laser at refractive-index variant part material and irradiating laser at f_1 and refractive-index variant part material, and it changes with existence of laser radiation. The electromagnetic wave of frequency f_1' which spreads the input waveguide 13 can be taken out to the external waveguides 163 and 164 and the external waveguide of the request of ... by irradiating laser any one of the refractive-index variant part material 193 and 194 and the ... For example, in taking out the electromagnetic wave of frequency f_1' to the external waveguide 164, it irradiates laser at the refractive-index variant part material 194. In this case, it passes without being introduced into the output waveguide 143 since resonance frequency f_1 differs from the frequency of this electromagnetic wave in the punctiform defect 153, since resonance frequency is in agreement with the frequency of this electromagnetic wave in the punctiform defect 154, the electromagnetic wave of frequency f_1' which spreads the input waveguide 13 is introduced into the output waveguide 144, and it is taken out by the desired external waveguide 164. Thus, the punctiform defects 153 and 154 which embedded refractive-index variant part material, and ... play the role of the switch which operates by the exposure of laser.

[0053]

The example of 1 configuration of the electromagnetic-wave-frequency filter which used the terrorism structure two-dimensional photograph nick crystal for drawing 5 into the field is shown. A body 21 is divided into two or more fields (forbidden-band field), and a hole 22 is arranged different array periods a_1 , a_2 , and a_3 for every field. Although three forbidden-band fields 201, 202, 203 were shown here, a further different forbidden-band field may be prepared above drawing 5. the array periods a_1 , a_2 , and a_3 of the hole 32 in each forbidden-band field, and ... $a_1 > a_2 > a_3$ -- it is made to become ... The input waveguide 23 is formed so that it may pass through all forbidden-band fields. The output waveguides 241, 242, and 243 which have a flection like the electromagnetic-wave-frequency filter of drawing 1, ..., the punctiform defects 251, 252, and 253, ... and the external waveguides 261, 262, and 263, and ... are formed for every forbidden-band field. A straight-line-like 3 defective donor mold cluster defect is used for each point-like defect.

[0054]

Actuation of the electromagnetic-wave-frequency filter of drawing 5 is explained using drawing 6. The electromagnetic wave of the resonance frequency f_{k1} of the punctiform defect 251 is introduced into the output waveguide 241 through the punctiform defect 251 among two or more frequencies f_1 which spread the input waveguide 23, and the electromagnetic wave which f_2, \dots, f_n superimposed. Similarly, the punctiform defects 252 and 253, the resonance frequency f_{k2} and f_{k3} of \dots , and the electromagnetic wave of \dots are introduced into the output waveguides 242 and 243 and \dots through each punctiform defect. The electromagnetic wave introduced into each output waveguide is taken out by the external waveguide linked to each.

[0055]

When a punctiform defect is a donor mold punctiform defect, it is the same as that of the electromagnetic-wave-frequency filter of drawing 1 that the loss to the direction of the outside of a field of an electromagnetic wave can be controlled. Especially in case reflection of the electromagnetic wave in the forbidden-band field boundary mentioned later is used, it is desirable to use a straight-line-like 3 defective donor mold cluster defect.

[0056]

In a terrorism structure two-dimensional photograph nick crystal, the frequency bands of the electromagnetic wave which can spread the inside of the input waveguide 23 differ for every forbidden-band field depending on the array period of a hole 32 into a field. Therefore, as shown in drawing 7, the electromagnetic wave of a frequency f_a is not included in the input waveguide frequency band 312 in the forbidden-band field 202, when contained in the input waveguide in the forbidden-band field 201 at the edge of the frequency band 311 which can be spread. In this case, the electromagnetic wave of the frequency f_a which spreads the input waveguide in the forbidden-band field 201 is reflected on the boundary 271 of the forbidden-band field 201 and the forbidden-band field 202. Since the electromagnetic wave of the frequency f_a which spreads input waveguide will be reflected on a boundary 271 even if it passes without going into the punctiform defect 251 if the punctiform defect 251 which makes this f_a resonance frequency is established, reinforcement of the electromagnetic wave of the frequency f_a introduced into the output waveguide 241 through the punctiform defect 251 can be made high compared with the case where that reflection does not exist. If resonance frequency is in the edge of the frequency band of input waveguide, the above-mentioned conditions will be fulfilled. Such conditions can be fulfilled if the aforementioned 3 deficit straight-lines-like donor mold cluster defect is used.

[0057]

It is one of the causes which weaken the reinforcement of the electromagnetic wave introduced into output waveguide that an electromagnetic wave is reflected according to a punctiform defect. When the phase of an electromagnetic wave is reversed with the reflection in boundaries 271, 272, and 273 and \dots , the punctiform defects 251, 252, and 253, \dots , boundaries 271, 272, and 273, the distance L_1 between \dots , L_2 , L_3 and \dots are made into $(2n-1)$ of the resonant wavelength of each point-like defect / twice. Thereby, boundaries 271, 272, and 273, the electromagnetic wave reflected in \dots , and the punctiform defects 251, 252, and 253 and the electromagnetic wave reflected by \dots interfere, is controlled, and can raise further the reinforcement of the electromagnetic wave introduced into output waveguide.

[0058]

Not all the electromagnetic waves that pass through the predetermined range of output waveguide (for example, 141 of drawing 1) necessarily pass a flection (for example, 171 of drawing 1). Frequency dependent [of the permeability of the electromagnetic wave in a flection] is controllable by adjusting the period of the hole 12 near the flection, a configuration, and magnitude. The example is shown in drawing 8 and drawing 9. Drawing 8 makes smaller than the path of other holes the path of the hole 121 which is in an outside corner at the latest of the flection 171 of the output waveguide of drawing 1. the case (drawing 1) where the parameter about the hole of a flection is made equal to a perimeter at drawing 9 (a) -- drawing 9 (b) -- the permeability and reflection factor of an electromagnetic wave frequency band of drawing 8 -- FDTD -- the result calculated by law (time domain finite difference method) is shown. [of a case] In count of drawing 9 (b), the radius of the hole 12 of $0.23a$ (a is the array period of a hole 12) and others was set to $0.29a$ for the radius of the hole 121 of drawing 8. By changing the path of the hole of a flection, the generalization frequency from which permeability serves as max can be changed to 0.267 (in the case of (b)) from 0.271 (in the case of (a)). Thereby, it is made in agreement with the resonance frequency 0.267 (generalization frequency) of the aforementioned 3 deficit straight-lines-like donor mold cluster defect, and the electromagnetic wave of predetermined frequency can be passed efficiently.

[0059]

In both the examples of drawing 8, the resonance frequency of a resonator and the frequency of the maximum permeability of a flection are proportional to the array period a . Therefore, if the design of a resonator and a flection is performed about one resonance frequency, the resonance frequency of a resonator and the frequency of the maximum permeability of a flection can be easily made in agreement by adjusting the array period a about other resonance frequency. Especially this is useful at the point that it is not necessary to design a flection for every ***** field, when using hetero structure. Moreover, such control can be similarly applied, when other parameters of the hole 12 near the flection are adjusted.

[0060]

In preparing a trailer in one side of the both ends of output waveguide, it depends for the effectiveness of transfer of an electromagnetic wave with the exterior in an other end on the distance between a trailer and a resonator. About this, it calculates using the example shown in drawing 10 (a). Let into a port 3 the side which performs a port 1 for one edge of the input waveguide 13, and delivers and receives the electromagnetic wave of a port 2 and the output waveguide 14 for an other end, and let a trailer side be a port 4. A reflection factor is set to 0 in a port 1 and a port 3. A reflection factor is set to 1 for the reason of for example, a contiguity different refractive-index field existing in a port 2 side. The reflection factor in the port 4 which is a waveguide trailer is set to 1. moreover, a port 1 - a port 3 -- each of distance $d1$ from each resonator, $d2$, and $d3$ is made into $(2n-1)$ of resonant wavelength / 4 times (n is a positive integer). The result to which the distance $d4$ between a port 4 and a resonator calculated the reinforcement of the electromagnetic wave which has the resonant wavelength of the resonator between one to 1.5 times of resonant wavelength to each port is shown in drawing 10 (b). This drawing shows that all the electromagnetic waves that have the resonant wavelength of a resonator are outputted to a port 3, when distance $d4$ is 1.25 times the resonant wavelength. $(2n-1)$ of resonant wavelength / in the case of 4 times (n is a positive integer), this corresponds the edge of output waveguide, and the distance between resonators.

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] The mimetic diagram of electromagnetic-wave-frequency filter ** using a two-dimensional photograph nick crystal which is one example of the electromagnetic-wave-frequency filter concerning this invention.

[Drawing 2] Drawing explaining spectral separation of the electromagnetic wave in the electromagnetic-wave-frequency filter of drawing 1.

[Drawing 3] The mimetic diagram of one example of the electromagnetic-wave-frequency filter using a two-dimensional photograph nick crystal which performs the ejection of two or more kinds of electromagnetic waves or installation which has a different frequency.

[Drawing 4] The mimetic diagram of one example of the electromagnetic-wave-frequency filter using a two-dimensional photograph nick crystal which has the switch function which outputs the electromagnetic wave which has a predetermined frequency to desired output waveguide.

[Drawing 5] The mimetic diagram of the example of 1 configuration of the electromagnetic-wave-frequency filter using a terrorism structure two-dimensional photograph nick crystal into a field which is one example of the electromagnetic-wave-frequency filter concerning this invention.

[Drawing 6] Drawing explaining spectral separation of the electromagnetic wave in the electromagnetic-wave-frequency filter of drawing 5.

[Drawing 7] The mimetic diagram showing the relation between forbidden-band fields about the transparency frequency band and resonance frequency of input waveguide in the electromagnetic-wave-frequency filter of drawing 5.

[Drawing 8] The mimetic diagram showing an example which adjusts the parameter of the hole of the flection of output waveguide.

[Drawing 9] The graph which shows the result of having calculated the permeability of the flection of the output waveguide in drawing 1 and drawing 8.

[Drawing 10] The graph by the distance between output waveguide and a resonator which shows the result of having calculated the reinforcement of the electromagnetic wave which has the resonant wavelength of the resonator in the edge of each waveguide.

[Description of Notations]

11 21 -- Body

12, 121, 22 -- Hole

13 23 -- Input waveguide

14, 141, 142, 143, 144, 241, 242 -- Output waveguide

15, 151, 152, 153, 154, 251, 252 -- Punctiform defect

16, 161, 162, 163, 164, 261 -- External waveguide
171 -- Flection
172 -- Trailer
18 -- Predetermined range
193 194 -- Refractive-index variant part material
201, 202, 203 -- Forbidden-band field
271, 272, 273 -- Forbidden-band field boundary

[Translation done.]

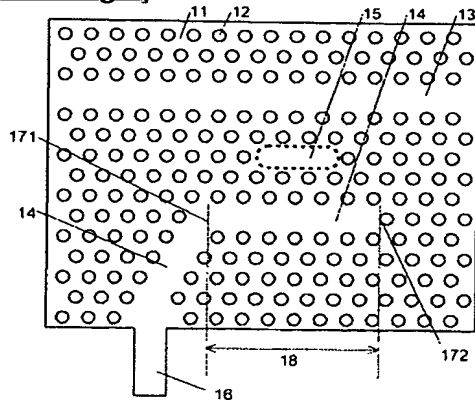
* NOTICES *

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

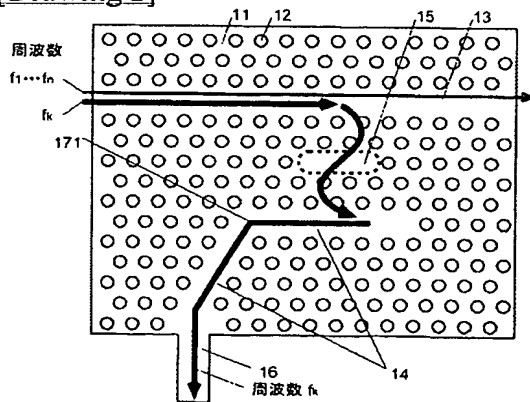
1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

DRAWINGS

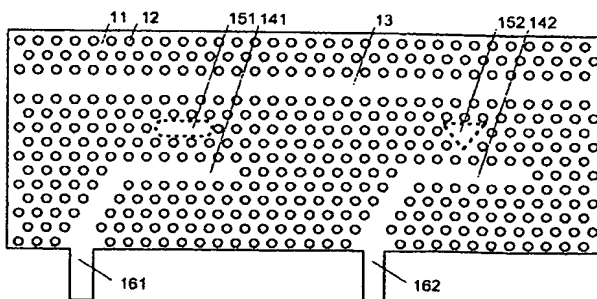
[Drawing 1]



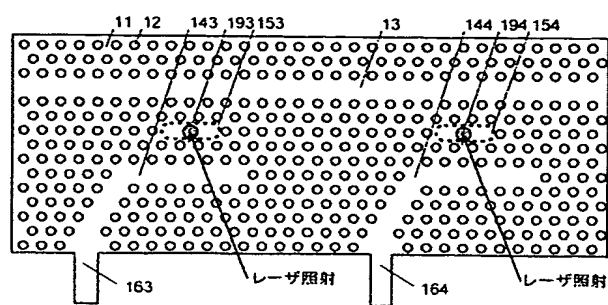
[Drawing 2]



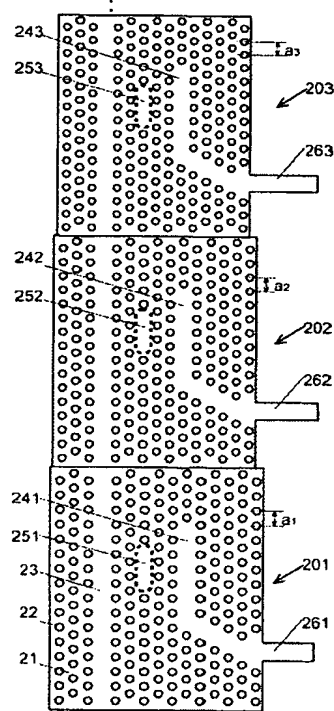
[Drawing 3]



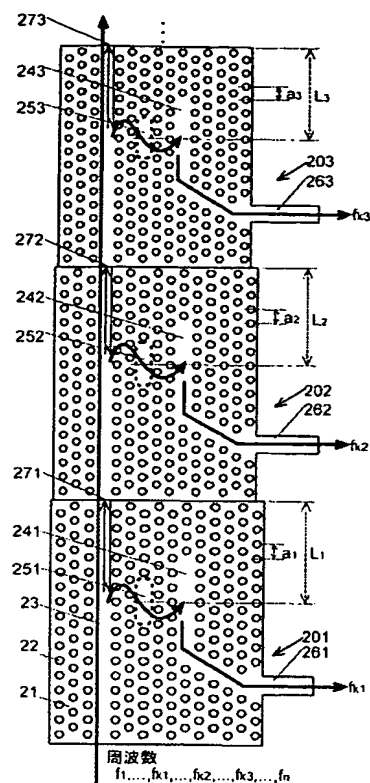
[Drawing 4]



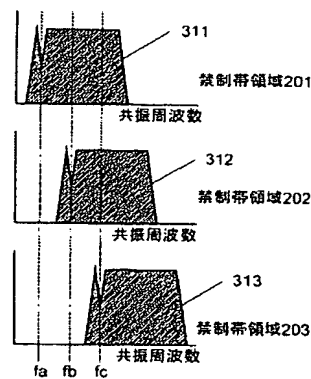
[Drawing 5]



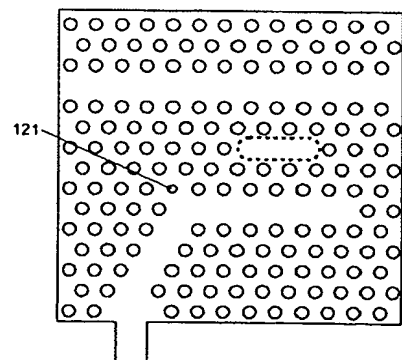
[Drawing 6]



[Drawing 7]

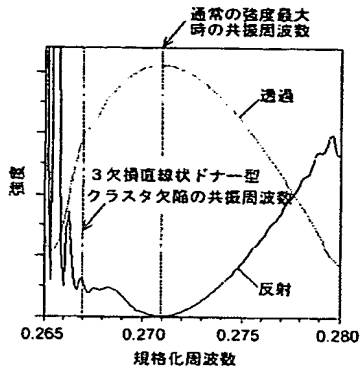


[Drawing 8]

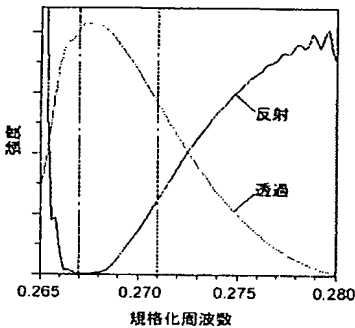


[Drawing 9]

(a) 曲げ部空孔の半径 $r=0.29$ (通常)

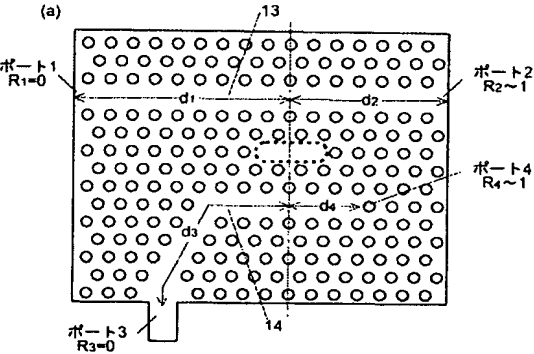


(b) $r=0.23$

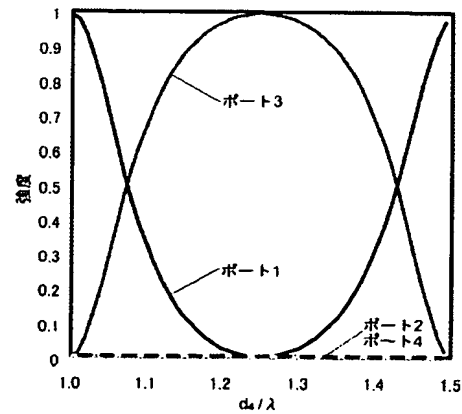


[Drawing 10]

(a)



(b)



[Translation done.]